INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2019 • N.º 517 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INFORME ESPECIAL

EL FUTURO DEL ÁRTICO

Cambio climático y pugna geopolítica

MEDICINA

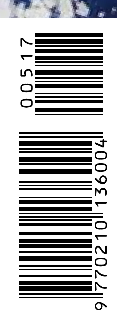
Nuevo enfoque para tratar y prevenir el cáncer

ASTRONOMÍA

ELT: el mayor telescopio del planeta

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Creatividad y sentido común en las máquinas



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL FUTURO DEL ÁRTICO | CREATIVIDAD ARTIFICIAL | CONTROL DARWINIANO DEL CÁNCER

OCTUBRE 2019 N.º 517

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Octubre 2019, Número 517

76



HÅKAN LILJENBERG, ALAMY





INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



El 6 de junio de 2019, el hielo marino se fragmentaba en el golfo de Amundsen, en el Ártico. El deshielo de la región ha llevado a los Estados del Ártico y a otros países a competir por las reservas de petróleo y gas natural de los fondos marinos, las rutas marítimas e incluso el posicionamiento militar. Fotografía del Sistema de Observación de la Tierra de la NASA (https://worldview.earthdata.nasa.gov).

redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto y septiembre de 2019

LAS CARAS DE LA POLUCIÓN

En «Contaminación atmosférica y salud pública» [Investigación y Ciencia, agosto de 2019], Mark J. Nieuwenhuijsen menciona diversas enfermedades relacionadas con la polución atmosférica. En nuestra opinión, hay otros procesos que también deberían incluirse.

En primer lugar, la contaminación no solo desencadena respuestas inmunitarias a nivel molecular al elevar los niveles de citocinas proinflamatorias y especies reactivas de oxígeno, sino que, además, participa en otro tipo de respuestas, también inmunitarias pero de tipo adaptativo. Por ejemplo, un estudio publicado este año («Air pollution as a determinant of rheumatoid arthritis»; Johanna Sigaux et al., *Joint Bone Spine*, vol. 86, 2019) ha demostrado que las partículas de escape diésel pueden provocar cambios en los linfocitos T que, a la postre, causan artritis.

En segundo lugar, diferentes trabajos han demostrado la relación entre polución atmosférica y algunas neoplasias malignas. Estudios realizados por 15 grupos en 9 países europeos han constatado la asociación entre contaminación y cáncer de mama en mujeres posmenopáusicas. Y varios estudios han observado una asociación entre la exposición a NO_x y cáncer de mama, aunque más acentuada en mujeres afroamericanas y japonesas americanas. Esta relación se confirmó al observar que era particularmente estrecha en mujeres que habitaban en lugares con mayor polución atmosférica, como aquellos cercanos a carreteras.

Cristóbal Bueno Jiménez
Profesor emérito de patología general
Universidad de Extremadura
Cristóbal Bueno García
Badajoz

Responde Nieuwenhuijsen: *La contaminación del aire se ha asociado a muchas más enfermedades que las mencionadas en el artículo, en el cual solo me centré en aquellas para las que hay pruebas excelentes. Pero cada día se publican más estudios, en especial sobre los mecanismos subyacentes de cómo la polución afecta a la salud. Hoy sabemos que tiene un gran impacto en nuestra vida diaria, nuestro sistema inmunitario y nuestras vías de estrés inflamatorio y oxidativo, por lo que es causa numerosas muertes y enfermedades.*

EMPATÍA MÉDICA

En «Las decisiones médicas son cosa de dos» [Investigación y Ciencia, Septiembre 2019], Alejandra Fernández Trujillo anima a los médicos a compartir las decisiones terapéuticas con los pacientes de una forma más empática. Por supuesto que no hizo falta una ley de autonomía del paciente para que los médicos tuvieran en cuenta los deseos genésicos de las mujeres antes de una histerectomía, sus condicionantes sociales o religiosos ni la fecha de la boda de su hija ante una intervención mayor.

Sin embargo, y dada la vulnerabilidad física y psicológica que implica ser portador de una enfermedad grave, es imposible —y quizá ni siquiera recomendable— una relación médico-paciente puramente horizontal. En efecto, cierto grado de paternalismo sigue presente, sobre todo en el ámbito oncológico, quizá derivado de la alta especialización. Es común que el médico exponga las opciones de tratamiento, sus pros y sus contras antes de que el paciente adulto y consciente (y muchas veces mal informado a través de medios electrónicos no supervisados) decida. Aquí no se abandona al paciente, sino que se le proporciona consejo profesional y se busca el consenso y bienestar familiar.

Hoy, los médicos no expresan preocupación significativa por la relación con el paciente, cuya autonomía se respeta desde hace décadas. Más bien padecen múltiples problemas relacionados con la relación médico-institución: precariedad de contratación, sobrecarga de trabajo, estructuras jerárquicas rígidas, ausencia de incentivos, interinidades eternas, etcétera. Y aunque la medicina es la profesión sistemáticamente mejor valorada por los españoles, presenta a la vez alarmantes tasas de *burn-out*, divorcios, depresión, alcoholismo e incluso suicidio.

Pedro David Delgado López
Servicio de Neurocirugía
Hospital Universitario de Burgos

Responde Fernández Trujillo: *El modelo de decisiones compartidas no pretende ser completamente horizontal, sino empoderar, dentro de lo posible, a los pacientes, en especial a los más vulnerables. Por supuesto, acompañar en las decisiones requiere a veces cierto grado de paternalismo. Sin embargo, es importante no olvidar que no todos los pacientes tienen las mismas necesidades.*

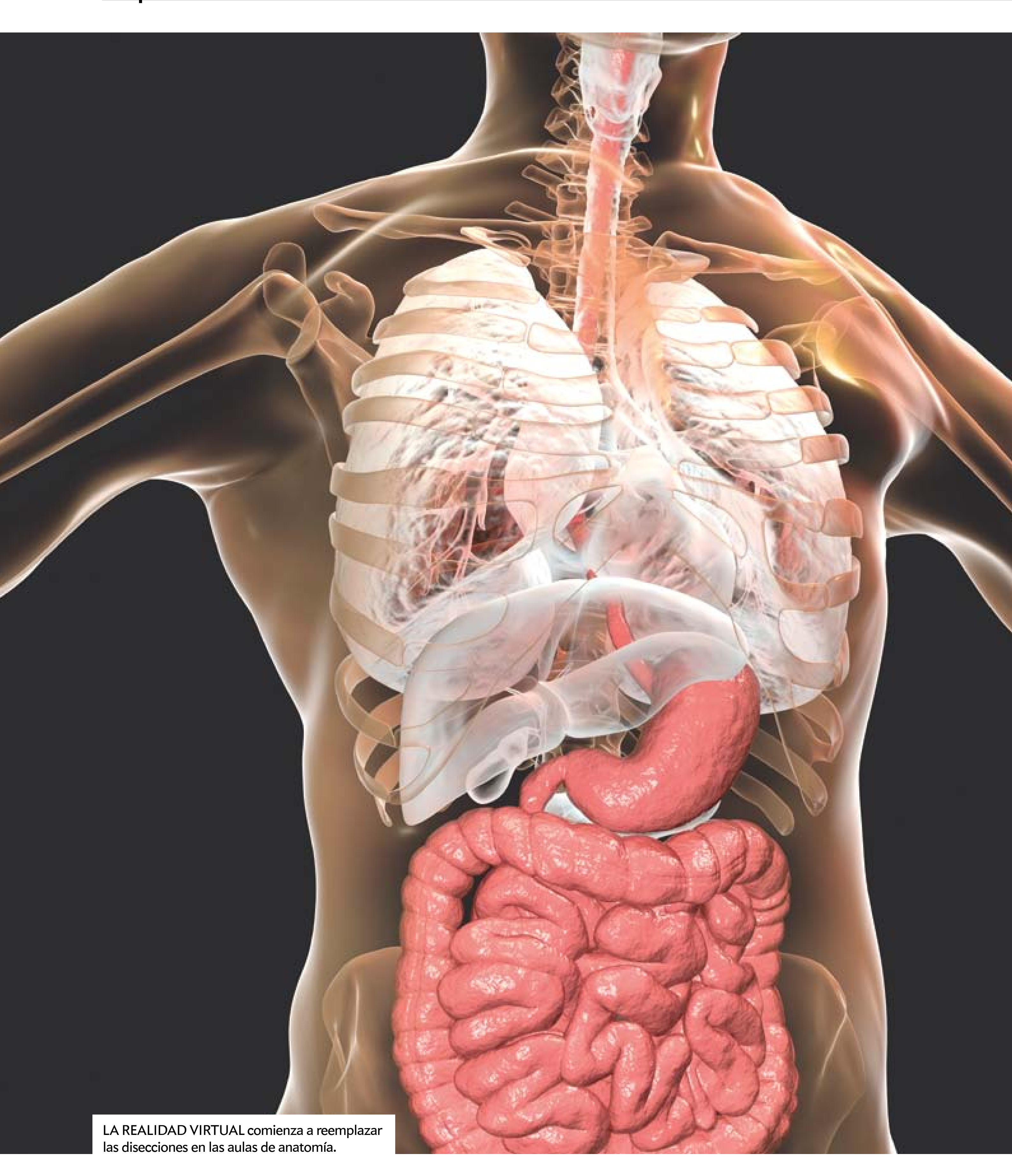
Pese a que la mayoría de los médicos se esfuerzan en respetar la autonomía del paciente, estudios como el citado en el artículo indican que puede que no todos los pacientes lo perciban así. Artículos como «The views of patients and relatives of what makes a good intensivist: A European survey» (colaboración CoBaTrICE, Intensive Care Medicine*, vol. 33, 2007) muestran que los pacientes reclaman explicaciones más comprensibles en atención a su competencia al ingresar en la UCI. Esto concuerda con los resultados del estudio «Satisfacción en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI): La opinión del paciente como piedra angular» (M. S. Holanda Peña et al.,* Medicina Intensiva*, vol. 41, 2017). Estos son dos estudios sobre pacientes críticos competentes, en un ámbito en el que las personas se sienten especialmente vulnerables, a pesar de lo cual continúan demandando información y no sentirse excluidos de las decisiones.*

Es cierto que la presión en el trabajo y las instituciones genera en los médicos desilusión y síntomas de burn-out *que sería importante prevenir para que la atención al paciente fuese óptima, pero esta cuestión requeriría un artículo propio.*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LA REALIDAD VIRTUAL comienza a reemplazar las disecciones en las aulas de anatomía.

DOCENCIA MÉDICA

El fin de las disecciones anatómicas

En algunas facultades de medicina, comienzan a ser sustituidas por simulaciones

Federico II, emperador del Sacro Imperio Romano que gobernó sobre buena parte de la Europa cristiana, emitió en 1231 un decreto por el cual exigía a las escuelas que médicos veteranos practicaran una disección de cadáver cada lustro. Fue este el tímido origen de una práctica que se convertiría en una de las piedras angulares de la formación médica. Durante el Renacimiento, las disecciones ayudaron a los estudiosos y a los artistas a adquirir conocimientos de primera mano sobre la anatomía humana. Hoy siguen siendo una experiencia esencial para los estudiantes del primer curso de medicina, una iniciación secular a los secretos que se esconden bajo la piel.

Ahora, transcurrido casi un milenio de aquella introducción comedida, las salas de disección podrían tener los días contados. Este año algunas facultades de medicina de Estados Unidos impartirán sus asignaturas de anatomía sin un solo cadáver. Los alumnos indagarán en las interioridades del cuerpo a través de recreaciones tridimensionales con realidad virtual, combinados con modelos palpables de los órganos e imágenes de pacientes reales, como ecografías y TAC.

Los creadores del programa esperan que la tecnología solvente algunos de los inconvenientes de los enfoques tradicionales. La disección de un cadáver requiere mucho tiempo, y ciertas partes son tan inaccesibles que pueden quedar destruidas en el proceso. Es más, las texturas y los colores de los órganos embalsamados difieren de los del cuerpo viviente, y los cuerpos donados suelen ser decrépitos o estar enfermos. «A decir verdad, la enseñanza de la anatomía no ha cambiado mucho desde el Renacimiento», afirma James Young, responsable de gestión académica de la Facultad de Medicina Lerner de la Clínica de Cleveland. El programa, iniciado en colaboración con la Universidad Case de la Reserva Occidental, ha inaugurado un nuevo campus sin cadáveres este verano. «A medida que la tecnología y el conocimiento mejoran, aumenta la presión por hacer las cosas mejor y más rápido y ofrecer a los alumnos una representación más adecuada de la anatomía humana.»

KATERYNA KON, GETTY IMAGES

Young, que estudió medicina en los años 70, sufrió una «disociación profunda» entre su formación anatómica y lo que vio durante su residencia en cardiología. Cuando intentó examinar los órganos de los pacientes mirando los resultados de las pruebas radiológicas o las filmaciones de minicámaras introducidas, comprobó que el interior del cuerpo no se parecía en nada a lo que había visto en los cadáveres. «Son totalmente distintos. Los órganos de un cadáver embalsamado están aplanados, comprimidos. Los colores no son vivos, propios de un cuerpo con vida», explica. Opina que la diferencia puede alterar el aprendizaje.

En cambio, las herramientas anatómicas virtuales ofrecen una visión más fiel de los órganos vivos, ayudan al alumnado a formarse una idea bien fundamentada de las partes del cuerpo, aseguran tanto él como otros docentes. Gracias a los visores de realidad virtual o a los guantes de realidad aumentada, que proyectan imágenes digitales sobrepuestas sobre las reales, es posible examinar un órgano desde cualquier ángulo. Se puede vincular la estructura con la función observando el corazón palpitante o las articulaciones en movimiento. También permiten seleccionar ángulos que abarcan otros órganos, o el aparato circulatorio o el sistema nervioso enteros, para ver mejor las relaciones entre las partes. «Quedé sorprendido», confiesa Mark Schuster, decano de la Facultad de Medicina Kaiser Permanente de Pasadena, California, que dará la bienvenida a su primera promoción de estudiantes de medicina en 2020. «Me habría gustado contar con ello cuando estudiaba anatomía. Me habría ayudado de verdad a encajarlo todo.» En el plan de estudios de primero, los estudiantes no pisarán una sala de disección.

La adopción de técnicas avanzadas tiene sentido en los programas médicos nuevos, que no deben soportar el peso de la tradición ni disponen de las instalaciones para la disección, pero incluso algunos ya existentes están incorporando herramientas digitales a sus clases de anatomía como complemento. «En mi opinión, la gran ventaja radica en que las imágenes son muy nítidas», apunta el profesor de anatomía y biología celular Darren Hoffman, quien emplea *software* interactivo y tridimensional de anatomía en sus cursos de la Facultad de Medicina Carver de la Universidad de Iowa. «Ayuda a adquirir la visión tridimensional del cuerpo, de modo que cuando uno observa el tobillo de un paciente, sabe qué hay bajo la superficie y cómo está engranado todo.»

Aparte de las ventajas educativas, prescindir de los cadáveres supone una decisión económica para los nuevos programas. El coste de una sala de disección y de las instalaciones anexas asciende a varios millones de euros, pues demanda un espacio amplio, así como la adopción de las medidas de seguridad exigidas por las normativas legales. Y aunque los cadáveres procedan de donaciones, la facultad debe desembolsar los gastos de preparación, mantenimiento y, por último, entierro de los restos. Esos costes suponen una traba mayor si cabe para las facultades de los países subdesarrollados, explica Young. Y, lo que es peor, muchos países afrontan un descenso en las donaciones y dependen de los cuerpos no reclamados para la disección, según un estudio de 2018.

La enseñanza de la anatomía sin disección no está exenta de inconvenientes. En un cuerpo virtual puede resultar difícil tener una percepción en profundidad, y los alumnos dejan de observar las variaciones anatómicas naturales de los individuos, según Hoffman. También existe el riesgo de que pierdan el impacto emocional, incluso filosófico, que entraña la manipulación de un cadáver, considerado por muchos como el primer paciente de todo médico. «Se podría decir que la experiencia infunde una mezcla de asombro y respeto. Uno reconoce lo maravilloso y complejo que es el cuerpo humano y comienza a ser consciente de que todos y cada

COGNICIÓN

Belleza matemática

Los legos coinciden en sus juicios al evaluar la elegancia de las demostraciones matemáticas

Los matemáticos describen a menudo sus teorías y demostraciones como «hermosas», llegando incluso a dejarse guiar en su trabajo por consideraciones estéticas. Y aunque cabría pensar que tales criterios podrían resultar opacos para los no expertos, una nueva investigación ha revelado que no es así: los profanos suelen coincidir a la hora de juzgar la belleza de una demostración matemática.

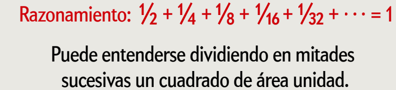
En el trabajo, publicado en agosto en *Cognition*, un matemático y un psicólogo efectuaron tres experimentos con cientos de participantes. La mayoría eran titulados superiores, pero no habían estudiado matemáticas más allá del cálculo universitario. En cada ensayo se les presentaron cuatro razonamientos matemáticos sencillos (dos de

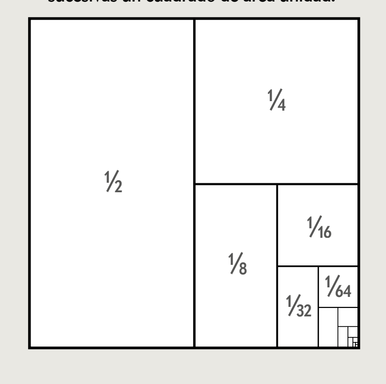


ellos con diagramas, como el mostrado aquí) y se comprobó que los hubieran entendido.

Primero, los participantes tuvieron que cuantificar cuánto «se parecía» cada razonamiento a cuatro pinturas de paisajes. Los resultados fueron concordantes: la mayoría coincidió a la hora de señalar qué argumentación encajaba mejor con cada cuadro, y sus elecciones se alinearon con las de ocho matemáticos. Por ejemplo, el razonamiento mostrado aquí fue mayoritariamente asociado al paisaje de Albert Bierstadt que aparece al lado. Un segundo experimento, en el que se usaron piezas de piano en lugar de pinturas, arrojó resultados similares.

En el tercer ensayo, los sujetos debían describir los razonamientos y los cuadros





usando una lista de diez adjetivos, incluido *hermoso*. Los resultados también concordaron, y la elegancia (seguida de la profundidad y la claridad) se reveló como factor principal para juzgar la belleza tanto en matemáticas como en arte. Samuel Johnson, psicólogo de la Universidad de Bath y coautor del artículo, explica que le sorprendió que, además, los adjetivos permitiesen predecir las parejas de cuadros y razonamientos

ALAMY (*cuadro*); FUENTE: «INTUITIONS ABOUT MATHEMATICAL BEAUTY: A CASE STUDY IN THE AESTHETIC EXPERIENCE OF IDEAS», SAMUEL G. B. JOHNSON Y STEFAN STEINERBERGER EN *COGNITION*, VOL. 189, AGOSTO DE 2019 (*razonamiento matemático*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

uno de los habitantes de este mundo es así, comenzando por uno mismo», declara Hoffman. Pero la sala no es el único modo de forjar la identidad médica de los alumnos, afirman él y otros. Por ejemplo, los futuros médicos pueden entrar en contacto antes con pacientes vivos durante la carrera.

Otra pregunta pendiente es si aprenderán tan bien con las herramientas digitales. Los estudios emprendidos por los organismos docentes se preguntan si la sustitución de las técnicas tradicionales por las nuevas no irá en detrimento de la calidad de la docencia. Si los resultados son positivos, podrían impulsar a más facultades a dar el gran paso. «Parece prematuro calificar esto como una tendencia, pero dado el gran número de centros que han mostrado interés, diría que algo se está cociendo», opina Schuster.

La formación anatómica se ha resistido al cambio durante tanto tiempo que Young y otros contemplan lo que está ocurriendo como un signo hacia una posible transición histórica. «No hay duda de que estamos ante el inicio de un cambio de paradigma», se pronuncia Young. «Tardará años en culminar, pero si me pregunta cómo serán las clases de anatomía en una década, le responderé que no habrá cadáveres. Esa es mi predicción.»

—Bahar Gholipour

---

del primer experimento. Ello indicaría que la correspondencia entre matemáticas y arte se basa en algo más que en rasgos geométricos superficiales.

«Los resultados son poco intuitivos pero muy convincentes», afirma Matthew Inglis, experto en educación matemática de la Universidad de Loughborough que no participó en el estudio. Sus investigaciones han hallado que los propios matemáticos discrepan sobre la calidad de una demostración. «A partir de mi propio trabajo, habría esperado que los juicios estéticos en matemáticas variaran de una persona a otra», apunta.

A Nathalie Sinclair, experta en enseñanza de las matemáticas de la Universidad Simon Fraser, también le sorprendió: «Dado el miedo que suscitan las matemáticas, habría pensado que la gente encontraría absurdas las preguntas», razona.

Stefan Steinerberger, matemático de Yale y coautor del artículo, cree que los profesores deberían resaltar la belleza de las matemáticas. «Las personas tienen la extraña tendencia a considerarse máquinas de cómputo incorpóreas», señala. «Eso es falso.»

—Matthew Hutson



LOS REBAÑOS DE GANADO reducen la incidencia de los incendios en el ecosistema de Serengueti y Mara.

JASON J. MULIKITA, GETTY IMAGES

ECOLOGÍA

El ganado aleja el fuego

El sobrepastoreo reduce los incendios beneficiosos para el ecosistema de la sabana

El continente africano alberga una gran variedad de hábitats, pero la sabana abarca casi la mitad de su extensión. Y donde crece la sabana, brota el fuego. «Es un elemento importante del ecosistema», afirma el ecólogo de la Universidad de Liverpool James R. Probert. Los incendios mantienen el predominio de los herbazales frente a los arbustos y espinos de mayor talla que invaden el paisaje. La disminución de las especies herbáceas podría expulsar a especies como el ñu, famoso por su espectacular migración anual.

Hace una década los investigadores achacaron al descenso de los incendios en el Parque Nacional del Serengueti, en Tanzania, la recuperación de las manadas de ñus diezmadas por una epidemia de peste bovina. Cuando millones de ellos pastan, el material combustible desaparece del paisaje, lo cual reduce la frecuencia y la virulencia de los incendios.

Pero Probert y sus colaboradores descubrieron que incluso después de la estabilización de las poblaciones de ñus acaecida a mediados de los años 90, los incendios siguieron menguando en la sabana, la vegetación que domina el ecosistema de los parques de Serengueti y de Masái Mara, situados a ambos lados de la frontera que separa Tanzania y Kenia. Los análisis de los datos captados por satélite que ha realizado este equipo indican que los incendios forestales habrían disminuido un 40 por ciento en la región entre 2001 y 2014, coincidiendo con un drástico aumento de los rebaños de ganado. Relataron sus hallazgos en julio en *Global Change Biology*.

«Es sabido que allí donde pastan multitud de herbívoros los incendios disminuyen. Pero no creo que nadie haya reparado hasta ahora en la magnitud de esa reducción y lo haya vinculado con el ganado doméstico», explica Probert.

«Se trata de una pauta realmente interesante», en palabras de John Fryxell, biólogo de la Universidad de Guelph, que no ha participado en el estudio. Advierte, empero, que quince años de datos siguen siendo demasiado pocos para extraer conclusiones definitivas. «Lo que una correlación a corto plazo como esa parece insinuar es que hay algo interesante que merecería un análisis empírico más minucioso», matiza. Esa investigación podría consistir en medir la frecuencia de los incendios o la intensidad del pastoreo en ciertas zonas, y hacer después un seguimiento de la respuesta del paisaje a lo largo del tiempo.

Probert señala que algunos de esos lugares están sufriendo una especie de «tragedia de los bienes comunes», en la que el ganado está consumiendo más recursos de los que el terreno es capaz de renovar. Opina que los conservacionistas deberían cooperar con los pastores en la elaboración de un plan de pastoreo rotativo, que repartiría el impacto de los rebaños en el tiempo y el espacio. Estudios como el de Probert seguirán revelando el modo en que los enclaves salvajes como los parques de Serengueti y Masái Mara están indisolublemente ligados con la actividad humana.

—Jason G. Goldman

COMPORTAMIENTO ANIMAL

¿Dónde depositan las ranas los renacuajos?

Al escoger las charcas más lejanas, reducen el riesgo de endogamia y de hallar competidores

Cuando los renacuajos de las ranitas dendrobátidas nacen de los huevos depositados en la hojarasca de la selva, se encaraman a lomos de sus pacientes padres, que los llevan a cuestas hasta el agua. Zoólogos que estudian en la selva amazónica estos anfibios de vivo colorido, a veces llamados ranas de dardo venenosas, han descubierto hace poco que los progenitores pasan de largo de las charcas próximas y prefieren otras más alejadas, un desplazamiento que supone un gasto de energía valiosa. A veces llegan a recorrer hasta 400 metros, a tenor de lo descrito en *Evolutionary Ecology* en julio. «Es un trayecto bastante largo», asegura el autor del estudio, Andrius Pašukonis, biólogo de la Universidad Stanford.

Él y sus colaboradores instalaron diminutos radiotransmisores con forma de pañal en siete ranas de dardo trilistadas (*Ameerega trivittata*) de Perú y 11 ranas de dardo tintoreras (*Dendrobates tinctorius*) de la Guayana francesa. A través de las señales de radio captadas trazaron el recorrido en 23 desplazamientos y anotaron cada vez que los padres cargados con su prole pasaban de largo de una charca o depositaban sus crías.

Las ranas trilistadas viajaron más lejos, cubriendo una media de 215 metros, cuando la charca más cercana estaba en promedio a solo 52 metros de su territorio. Las tintoreras viajaron en promedio unos 39 metros, dejando atrás charcas que estaban a una distancia media de 19 metros. Dos llegaron a abandonar la protección de la selva para depositar a sus renacuajos en prados inundados.



UNA RANA MACHO provista de un radiotransmisor lleva a cuestas sus renacuajos.

Pese al coste energético y al alto riesgo de topar con depredadores, el elegir charcas distantes para los renacuajos brindaría ventajas evolutivas, como reducir el riesgo de endogamia y la competencia por los recursos, explica Pašukonis. Aun así, resulta difícil decir qué impulsa exactamente a estas ranitas a ir más lejos, matiza la neurobióloga Sabrina Burmeister de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, investigadora de la cognición de las ranas venenosas, que no ha intervenido en el nuevo estudio.

Los resultados podrían ayudar a proteger los anfibios amenazados por la desaparición de su hábitat. «Conocer las áreas de campeo y el tipo de entornos que frecuentan, y por qué lo hacen, reviste suma importancia para cualquier campaña de conservación», aclara Burmeister. *—Jennifer Leman*

BIOQUÍMICA

Venenos terapéuticos

Ciertos compuestos tóxicos de los escorpiones podrían ayudar a combatir infecciones graves

Pocos pensarán que un escorpión pueda ser beneficioso. Pero se han aislado dos nuevos compuestos químicos del veneno de estos arácnidos que podrían servir como tratamientos contra las infecciones estafilocócicas y la tuberculosis farmacorresistente. El coste del veneno de alacrán es exorbitante: recolectar un mililitro costaría en torno a 10.000 euros, asegura Richard Zare, químico de la Universidad Stanford y autor de un estudio que vio la luz el pasado junio en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Calcula que la cantidad extraída a un solo individuo apenas alcanza unas milésimas de mililitro y que este tarda hasta más de dos semanas en reponerla. Aun así, merece la pena seguir estudiando el veneno. Algunas de sus sustancias poseen interesantes propiedades medicinales y pueden ser sintetizadas en el laboratorio con un coste menos prohibitivo.

Investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México extrajeron el veneno de un alacrán propio del este del país, *Diplocentrus melici*. Separaron sus componentes y ensayaron algunos con las bacterias *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Mycobacterium tuberculosis*. Dos de ellos, que aislados resultaron ser de color rojo y azul, mataron los estafilococos y las micobacterias, lo que apunta a un posible uso como antibióticos.

Enviaron pequeñas muestras de ambos al grupo de Zare en Stanford para averiguar la composición y la estructura molecular. El grupo sintetizó a continuación los compuestos y los remitió al Instituto de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, en Ciudad de México.

Allí, los patólogos los administraron a ratones infectados por la tuberculosis y a muestras de tejido humano que albergaban estafilococos. El compuesto rojo demostró ser más eficaz contra estos últimos, mientras que el azul funcionó mejor con la tuberculosis, incluida una cepa resistente a los antibióticos, sin dañar el epitelio pulmonar de los roedores.

Christine Beeton, fisióloga molecular y biofísica del Colegio Baylor de Medicina que estudia posibles aplicaciones terapéuticas del veneno y es ajena al nuevo trabajo, afirma que el enfoque adoptado en el estudio parece alentador. Pero advierte que es preciso seguir estudiando los compuestos en animales de mayor talla y que la síntesis de la cantidad necesaria para iniciar el estudio en humanos podría entrañar dificultades.
—Rachel Crowell



Diplocentrus melici

ANDRIUS PAŠUKONIS, UNIVERSIDAD STANFORD (*rana*); PABLO BEREA NÚÑEZ (*escorpión*)

NEUROCIENCIA

Falsa ilusión de profundidad

Una corrección visual habitual podría distorsionar la percepción del movimiento en tres dimensiones

El cristalino del ojo pierde capacidad de enfoque con los años. Una corrección habitual para este problema, la monovisión, consiste en prescribir lentes de contacto o gafas que enfoquen un ojo para la visión de cerca, como la lectura, y el otro para la visión de lejos, como la conducción al volante. Cerca de 10 millones de estadounidenses la usan, pero un nuevo estudio ha descubierto que puede causar una ilusión óptica peligrosa.

Hace casi un siglo, el médico alemán Carl Pulfrich describió un fenómeno óptico llamado hoy efecto de Pulfrich: cuando un ojo ve una imagen más oscura o con menos contraste que el otro, un objeto que se desplace lateralmente (como un péndulo) parece viajar trazando un arco tridimensional. Esto ocurre porque el cerebro procesa la imagen más oscura o con menos contraste con más lentitud que la mejor iluminada o con mayor contraste, un desfase que percibe como tridimensional.

Johannes Burge, psicólogo en la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores han descubierto recientemente que la monovisión causa un efecto de Pulfrich invertido. Invitaron a una serie de participantes a que mirasen a través de un aparato que proyectaba una imagen distinta ante cada ojo (una borrosa y otra enfocada) de un objeto que se movía de lado a lado. Comprobaron así que los observadores procesaban la imagen borrosa un par de milisegundos antes que la nítida, lo cual hacía que el objeto pareciera curvarse ante la pantalla. Aparecía más próximo al observador a medida que se desplazaba a la derecha (si el ojo izquierdo veía la imagen borrosa) o a la izquierda (si la veía el derecho). «Podríamos pensar que no es muy grave», explica Burge, pero basta para que un conductor en un cruce erre en la ubicación de un ciclista en marcha en una distancia equivalente al ancho de un carril (*gráfica*).

Burge y sus colaboradores preveían justo lo contrario: que el cerebro procesaría la imagen borrosa con más lentitud a causa de su menor contraste, similar al efecto de Pulfrich tradicional. Resolvieron esta paradoja al comprobar que el desenfoque reduce el contraste de los detalles pequeños mucho más que el de los gruesos. Puesto que el cerebro tarda más en procesar los pequeños, la imagen borrosa es procesada antes. Los investigadores publicaron su estudio en agosto en *Current Biology*.

Douglas Lanska, neurólogo jubilado de la Universidad de Wisconsin que había estudiado el efecto de Pulfrich y no ha formado parte del estudio, califica los hallazgos de «curiosos», pero matiza: «Creo que el modelo ha sobrestimado un poco la repercusión que tiene en condiciones reales». Convendría estudiar el efecto de Pulfrich inverso fuera del laboratorio, opina. Burge y su equipo averiguaron que el efecto puede corregirse tintando la lente borrosa, pues así se crea un efecto de Pulfrich clásico que cancela el inverso. El cerebro también podría compensar las limitaciones de la monovisión, pero según Burge es preciso seguir estudiando el fenómeno. Subraya que esas percepciones erróneas son poco frecuentes, lo cual indica que «en circunstancias normales nuestro sentido de la vista está calibrado de forma exquisita.»

—*Tanya Lewis*

El efecto de Pulfrich inverso

La monovisión, una corrección visual habitual en la que la lente colocada ante un ojo se enfoca para la vista de cerca y la del otro para la de lejos, hace que un ojo forme una imagen borrosa a una distancia dada. En el fenómeno denominado efecto de Pulfrich inverso, el cerebro procesa la imagen borrosa en menos tiempo que la nítida. Se crea así la ilusión de que un objeto o persona en movimiento (un ciclista, por ejemplo) parece estar más lejos (*izquierda*) o más cerca (*derecha*) de lo que realmente está. Para pecar de precavidos, los investigadores plantean que la lente para ver de lejos debería colocarse en el ojo derecho en los países en que se conduce por la derecha, y en el izquierdo en los que se circula por el lado contrario.

MATERIALES

Una trampa molecular

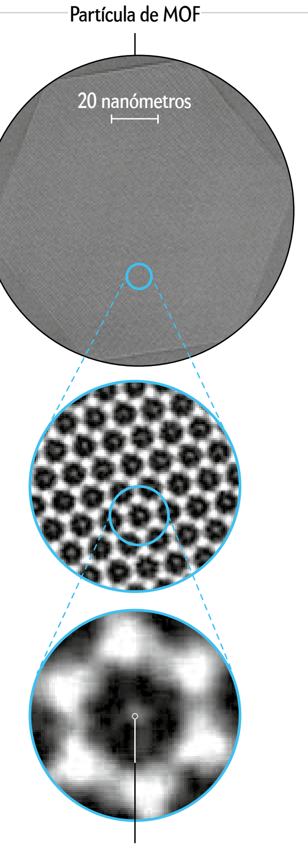
Obtienen las primeras imágenes de moléculas de CO_2 capturado

Por primera vez, los investigadores han obtenido imágenes de moléculas individuales de CO_2 atrapadas en «jaulas» moleculares. Para conseguirlo, han tomado prestada una técnica usada en biología. Los armazones organometálicos (MOF, por sus siglas en inglés) son polímeros excepcionalmente porosos diseñados para capturar determinadas moléculas de gas, lo que permite separar o purificar vapores. Estos materiales absorben grandes cantidades de gas: un solo gramo puede presentar una superficie de captura mayor que un campo de fútbol. Entre otras aplicaciones, se ha propuesto emplear MOF para retener hidrógeno en los depósitos de los automóviles o en pilas de combustible, así como para capturar emisiones de CO_2.

Cuando Yuzhang Li, científico de materiales de Stanford, y sus colaboradores examinaron con un microscopio electrónico de transmisión una muestra de MOF que atrapaba CO_2, encontraron que el potente haz de electrones del instrumento había derretido el armazón, explica Li. Así que probaron una estrategia usada a menudo por los biólogos para obtener imágenes de proteínas, virus y orgánulos celulares: emplearon nitrógeno líquido para congelar y estabilizar el material a una temperatura de −170 grados Celsius, al tiempo que disminuyeron la intensidad del haz de electrones. Ello les permitió tomar fotografías de larga exposición no solo de un corte del material, llamado ZIF-8 (*arriba y centro*), sino también de las moléculas de CO_2 atrapadas en él (*abajo*). Los resultados se publicaron en agosto en la revista *Matter*.

Este proceso de ultracongelación permitirá estudiar de manera detallada cómo atrapan los MOF el gas, asegura Jeffrey Long, químico de materiales de la Universidad de California en Berkeley que no participó en el estudio. Por ejemplo, concluye Li, en el futuro podrían generarse imágenes 3D para investigar la rapidez y la eficacia con que estos materiales absorben los gases.

—*Sid Perkins*



FÍSICA CUÁNTICA

Partículas de sonido

Aislar fonones abre nuevas vías en computación cuántica

Los investigadores se han hecho con el control de la esquiva «partícula» del sonido: el fonón. Los fonones son las unidades básicas de energía vibratoria en un material, y pueden considerarse partículas en el mismo sentido en que los fotones son partículas de luz. Estas últimas se usan de manera habitual para almacenar información en los prototipos de ordenadores cuánticos. Emplear sonido en lugar de luz podría gozar de ciertas ventajas, pero, para ello, los fonones deberían poder controlarse a escalas diminutas.

Hasta hace poco eso no era posible; el mero hecho de detectar un fonón lo destruía. Los primeros métodos se basaban en convertir los fonones en señales eléctricas mediante qubits superconductores, un tipo de circuito cuántico. Estos sistemas aceptan cantidades concretas de energía: si la energía de un fonón coincide con ellas, el circuito puede absorberlo. Eso destruye el fonón, pero delata su presencia.

En un trabajo reciente, una colaboración del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU. y la Universidad de Colorado en Boulder ajustó su qubit superconductor de manera que los fonones, en vez de destruirse, acelerasen la corriente. De este modo, los experimentadores lograron cuantificar el cambio que cada fonón causaba en ella.

«Se han logrado éxitos impresionantes en el uso de qubits superconductores para controlar los estados cuánticos de la luz. Y teníamos curiosidad: ¿qué podemos hacer con el sonido que no permita la luz?», explica Lucas Sletten, de la Universidad de Colorado en Boulder y autor principal del estudio, publicado en junio en *Physical Review X*.

Una diferencia es la velocidad: el sonido viaja mucho más despacio que la luz. Los investigadores aprovecharon esta circunstancia para coordinar las interacciones entre el circuito y los fonones. Atraparon fonones de frecuencias determinadas entre dos «espejos acústicos» (que reflejan el sonido), y el tiempo relativamente largo que tardaba el sonido en completar un viaje de ida y vuelta permitió lograr una coordinación precisa. Los espejos estaban separados por el grosor de un cabello; un control similar de la luz hubiese requerido un alejamiento de 12 metros.



La «lentitud» del sonido también permitió identificar fonones de distinta frecuencia. Sletten explica que los ordenadores cuánticos aumentan su capacidad añadiendo más qubits superconductores. Sin embargo, lo mismo podría lograrse con un solo qubit que procesara información con varias frecuencias.

«Sin duda se trata de un hito», valora Yiwen Chu, física de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich que no participó en el estudio. La experta recuerda que, en su día, experimentos análogos con luz allanaron el camino a la investigación actual sobre ordenadores cuánticos.

Las aplicaciones similares para el sonido aún se antojan distantes. Entre otras cosas, los científicos deben encontrar la manera de conseguir que los fonones sobrevivan mucho más tiempo que los 600 nanosegundos habituales. Con todo, el nuevo trabajo debería abrir caminos en computación cuántica.

—*Leila Sloman*

FUENTE: «CRYO-EM STRUCTURES OF ATOMIC SURFACES AND HOST-GUEST CHEMISTRY IN METAL-ORGANIC FRAMEWORKS», YUZHANG LI ET AL. EN *MATTER*, VOL. 1, N.º 2, AGOSTO DE 2019 (*micrografías*); AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*); THOMAS FUCHS (*cabeza*)



ASTRONOMÍA

Detector de sobremesa

Un pequeño detector de ondas gravitacionales podría estudiar la materia oscura

Durante el primer segundo que siguió a la gran explosión pudieron haberse creado agujeros negros cuya formación habría generado ondas gravitacionales. Ahora, un equipo de investigadores de la Universidad del Noroeste de EE.UU. ha comenzado a diseñar un pequeño sensor que, por primera vez, podría detectar esos aullidos primordiales.

En 2016, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), un coloso de mil millones de dólares, anunció la primera detección de ondas gravitacionales. Aquella señal provenía de la colisión y posterior fusión de dos agujeros negros de masa estelar. Desde entonces, este gigantesco experimento también ha registrado ondas procedentes de la fusión de estrellas de neutrones. El detector propuesto ahora, que obtuvo financiación en julio, mediría ondas de frecuencia más elevada, como las generadas por los agujeros negros del universo naciente.

Los experimentos actuales de ondas gravitacionales, como LIGO y Virgo, usan un sistema de espejos y «brazos» láser de varios kilómetros para medir los diminutos cambios de distancia causados por el paso de ondas gravitacionales. El nuevo Detector de Sensores Levitados emplearía láseres para suspender una cuenta de vidrio en el interior de una cámara de vacío, lo que le permitiría alcanzar una gran sensibilidad con brazos de apenas un metro de largo. El instrumento intentaría escuchar el «eco» de la formación de agujeros negros primordiales, así como las huellas gravitatorias de cierta clase de partículas hipotéticas llamadas axiones. Ambos son candidatos a constituir la materia oscura, la misteriosa sustancia invisible que los físicos creen que da cuenta de la mayor parte de la masa del universo.

«Creo que hay cada vez más interés en ampliar el intervalo de frecuencias en la búsqueda de ondas gravitacionales, sobre todo tras los emocionantes descubrimientos de LIGO», comenta Andrew Geraci, físico de la Universidad del Noroeste e investigador principal del proyecto. «Estas fuentes relacionadas con la materia oscura son más especulativas; las encontradas por LIGO ya se esperaba que existiesen.»

Para tratar de detectar esas ondas, el proyecto de la Universidad del Noroeste contará con un millón de dólares de la Fundación W. M. Keck, una organización benéfica con sede en Los Ángeles, así como con ayuda de la universidad. Tras dos años de desarrollo, un prototipo de un metro de largo funcionaría de manera preliminar durante un año, lo que allanaría el camino para construir un detector mayor, de hasta diez metros de longitud.

Muchos investigadores se preguntan si hay algún objeto con energía suficiente para ser una fuente intensa de ondas gravitacionales a frecuencias tan elevadas (superiores a los 10 kilohercios), explica Rana Adhikari, físico experimental del Instituto de Tecnología de California que no participa en el proyecto. Sin embargo, añade, las hipotéticas fuentes vinculadas a la materia oscura podrían ser la excepción: «Puede que en este régimen de ondas gravitacionales "ultrasónicas" el universo nos sorprenda con una gran cantidad de fenómenos exóticos », concluye.

—Jeremy Hsu

GETTY IMAGES (*ondas*); MUSEO DE LAS CIENCIAS DE VALENCIA (*agenda*)

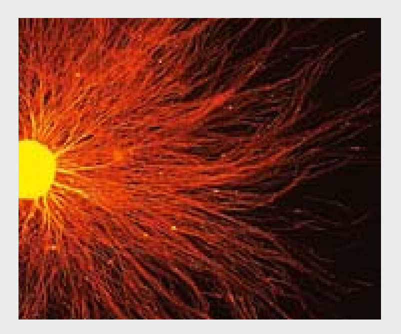
AGENDA

CONFERENCIAS

2 de octubre
La producción de oro en el universo
Gabriel Martínez-Pinedo, Universidad Técnica de Darmstadt
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

10 de octubre
Matemáticas: Las geometrías y otras revoluciones
Marina Logares, Universidad de Plymouth
Casa de las Ciencias
Logroño
www.csic.es

24 de octubre
Conectando y reconectando el cerebro con los sentidos
Guillermina López Bendito, Universidad Miguel Hernández
Museo de las Ciencias
Valencia
www.cac.es



28 de octubre
Ciberseguridad
Luis Jiménez, Centro Criptológico Nacional
Gianluca D'Antonio, Asociación Española para el Fomento de la Seguridad de la Información
Fundación Juan March
Madrid
www.march.es

OTROS

2 de octubre — Mesa redonda
Centenario del nacimiento de Ramon Margalef
Ateneo Barcelonés
Barcelona
www.ateneubcn.org

18 de octubre — Taller
Química en la cocina
Organiza: Colegio Oficial de Químicos
Centro Cívico Vil·la Urània
Barcelona
www.taulaperiodica.cat

CONSERVACIÓN

¿Qué provoca el declive de los insectos?

La destrucción del hábitat y la contaminación son las causas principales de que el treinta por ciento de las especies estén amenazadas

FRANCISCO SÁNCHEZ-BAYO Y KRIS A. G. WYCKHUYS



ALGUNOS DE LOS GRUPOS DE INSECTOS más afectados son los coleópteros (como los bupréstidos, *a*), las abejas (como la de la miel, *b*) y los lepidópteros (como la mariposa monarca, *c*).

KRIS WYCKHUYS (*bupréstido*); FRANCISCO SÁNCHEZ-BAYO (*abeja y mariposa*)

Numerosos estudios han advertido de que los insectos están desapareciendo a un ritmo mayor que otros grupos de animales. Algunos trabajos recientes, realizados por separado en Alemania, Puerto Rico e Inglaterra, han apuntado a una pérdida de la biomasa de insectos de entre el 70 y el 90 por ciento desde los años 80 del siglo pasado hasta ahora, lo que supone una reducción media del 2,5 por ciento al año. Asimismo, los estudios de revisión que han examinado de forma global los datos de varias investigaciones han confirmado esas tendencias. Sin embargo, tales trabajos han tenido un alcance parcial, y se han restringido a grupos individuales de insectos de regiones específicas.

Ahora, en una revisión publicada por nosotros el pasado abril en la revista *Biological Conservation*, hemos presentado un análisis exhaustivo de taxones de insectos a partir de los datos disponibles de diferentes partes del mundo. Hemos examinado y comparado los resultados de 73 estudios realizados a largo plazo en los cinco continentes. Los resultados demuestran que el 41 por ciento de las especies de insectos se hallan actualmente en declive, y un 30 por ciento están amenazadas (sus poblaciones se han reducido en un 30 por ciento o más). En conjunto, su tasa de extinción local es unas ocho veces superior a la de los vertebrados. Los grupos más afectados parecen ser los escarabajos peloteros, las polillas, las mariposas, las abejas y los tricópteros.

La mayoría de los datos analizados se han recopilado en Europa y Norteamérica, mientras que los datos disponibles de las zonas tropicales y países en desarrollo son muy escasos y dispersos. Aun así, queda claro que estas regiones sufren los mismos problemas que achacan a los países industrializados. Por ejemplo, el 63 por ciento de las abejas de las orquídeas del Brasil se halla en declive, y lo mismo sucede con el 19 por ciento de las mariposas de Borneo.

Nuestro trabajo no se ha limitado a describir el trágico panorama de este grupo de animales, sino que ha indagado en las causas que han llevado a esta situación. De los diferentes estudios se extrae un total de 13 causas, las cuales pueden ordenarse en cuatro grandes gru-

pos: la destrucción de los hábitats naturales, la contaminación, las especies invasoras y el cambio climático.

Destrucción de los hábitats

La conversión de los ecosistemas naturales en campos de cultivo, terrenos industriales o zonas urbanas es la primera causa del declive de las poblaciones de insectos. Ya se trate de pastizales convertidos en campos de trigo, de humedales en campos de arroz, o de bosques en cultivos de soja y verduras, la agricultura moderna ha desplazado a muchas especies de insectos que no encuentran ya sitio donde vivir o reproducirse.

En concreto, la eliminación de lindes arbolados y arbustivos entre campos de labranza es responsable de la pérdida de carábidos y muchos otros insectos beneficiosos para la agricultura, por ser enemigos naturales de las plagas. Los cultivos intensivos no permiten el barbecho, lo que reduce, año tras año, la diversidad de las plantas silvestres y los insectos que dependen de ellas. Más aún, los extensos monocultivos benefician solo a las especies dañinas, mientras que las mariquitas, las abejas y otros polinizadores no prosperan porque las plantas silvestres que les sirven de refugio o alimento han sido eliminadas.

El regadío canalizado ha supuesto también la simplificación de los cursos naturales de agua, que se encuentran ahora desprovistos de la vegetación acuática que daba cobijo a los insectos típicos de arroyos y riberas, como las libélulas, los tricópteros, los plecópteros, las efémeras, los garapitos y los coleópteros acuáticos. Estos insectos son una fuente primordial de alimento para muchos peces y ranas.

La reducción de los bosques naturales conlleva la pérdida de innumerables especies de insectos y vertebrados. En Europa, los insectos más afectados son los cerambícidos y otros coleópteros. En los países tropicales, la desforestación es sin duda la primera causa del declive de este grupo, aunque no podamos medir con precisión su magnitud debido al desconocimiento de las faunas que allí habitan. Las talas no solo se producen por la expansión agrícola, sino también por la explotación de la madera, por el turismo y por la urbanización progresiva, la cual avanza implacablemente en esas zonas del planeta.

Contaminación

El desarrollo industrial del pasado siglo ha supuesto la contaminación directa o accidental del aire, las aguas y el suelo en que vivimos. No hay ecosistema actual que no sufra las consecuencias de la polución, y los insectos no son una excepción.

Entre la enorme variedad de sustancias que los afectan, destacan las que son tóxicas en sí mismas, en particular los insecticidas y otros plaguicidas. Estos se aplican en la agricultura para combatir plagas, controlar malas hierbas y enfermedades de los cultivos, pero también en zonas forestales y urbanas, así como en humedales y zonas tropicales para eliminar los vectores de enfermedades como la malaria.

El problema es que los insecticidas no matan solo a los insectos que dañan a los cultivos o los bosques, sino también a los que son beneficiosos para la agricultura, entre ellos las mariquitas, las abejas, las avispas parasíticas y las larvas de las libélulas. Hay pruebas sólidas de que los plaguicidas causan estragos entre las poblaciones de insectos, en particular entre los acuáticos y los polinizadores, muchas de cuyas especies se hallan en declive.

Aparte de matar de forma directa a los insectos, los plaguicidas pueden tener también efectos indirectos. La desaparición de las libélulas de los campos de arroz en Japón desde mediados de los años 90 se debe sobre todo a la introducción de dos tipos de insecticidas: el fipronil y los neonicotinoides. Por ser muy tóxicos, su presencia en las aguas elimina a muchas especies de insectos acuáticos, cuyas poblaciones no suelen recuperarse. Pero, al ser solubles en agua, estos insecticidas son absorbidos también por la vegetación y aparecen en el néctar y el polen de las plantas que crecen en los márgenes de los arroyos y de los cultivos tratados, por lo que afectan así a las abejas y los innumerables insectos que las visitan. Se sabe que la ingestión de polen y néctar contaminados con estos insecticidas producen trastornos en la memoria y la orientación de las abejas, inhiben su sistema inmunitario y reducen la fertilidad de los zánganos y la reina. En varias partes del mundo, el uso de estos productos está también relacionado con el descenso poblacional de mariposas.

Además del uso de plaguicidas, otras prácticas de la agricultura moderna están mermando las poblaciones de insectos. Una es la sustitución de los abonos naturales (estiércol, plantas leguminosas) por otros artificiales. Además, la falta de rotaciones con cultivos de legumbres ha supuesto la desaparición de varias especies polinizadoras, como varios abejorros de Inglaterra y de otros países. El uso creciente de herbicidas ha supuesto también la eliminación de muchas plantas silvestres que proporcionaban cobijo y alimento a muchos insectos, entre ellos los más beneficiosos para la agricultura.

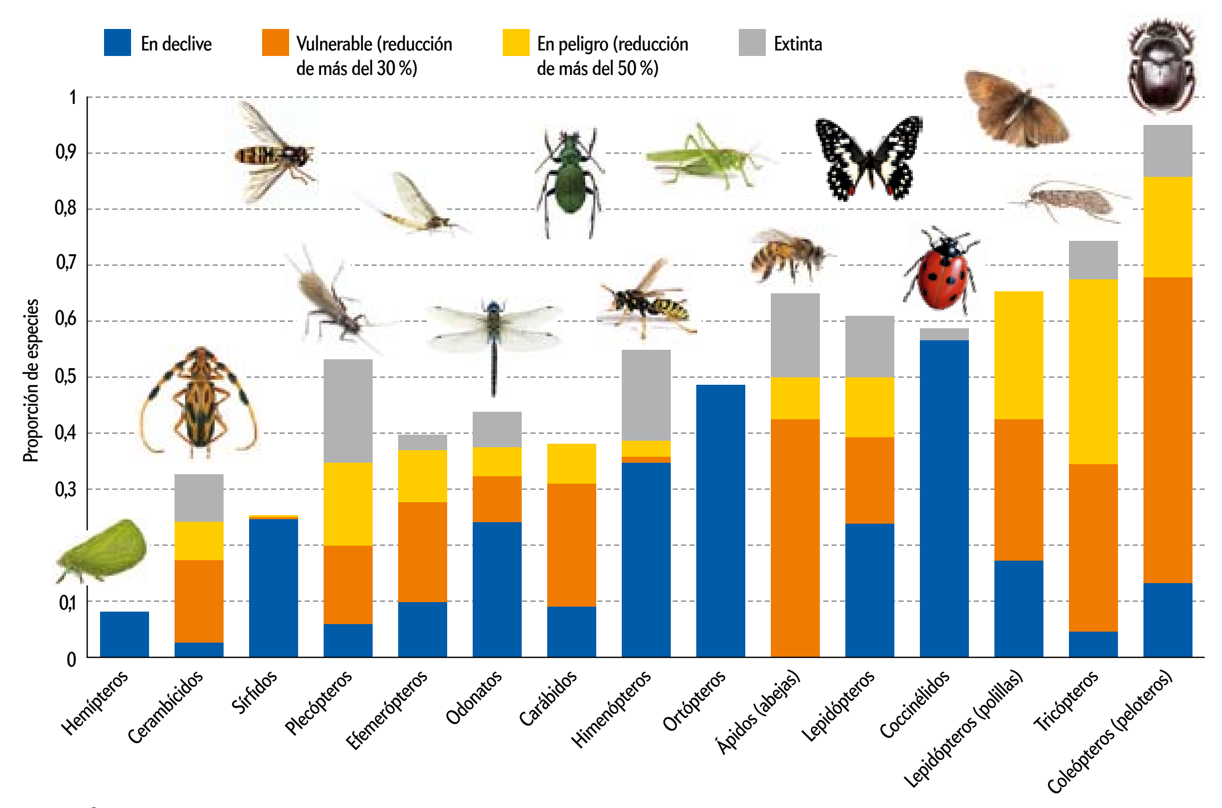
En cuanto a fuentes de contaminantes en el sector pecuario, destacan las avermectinas, productos que se utilizan para tratar las lombrices parásitas del ganado. Debido a su persistencia, aparecen en las boñigas, y, por su gran toxicidad, eliminan las larvas de escarabajos peloteros, el grupo de insectos con mayor proporción de especies amenazadas.

Por último, los vertidos industriales, junto con la contaminación urbana asociada a las aguas residuales, han sido y seguirán siendo una causa importante de la desaparición de muchos insectos y otros organismos acuáticos [*véase* «Los anfibios y la contaminación química», por Andrés Egea Serrano, Rick A. Relyea y Miguel Tejedo; Investigación y Ciencia, octubre de 2013]. Ya sea por la polución industrial y urbana o por los residuos de plaguicidas en zonas agrícolas, decenas de especies de efémeras, tricópteros y plecópteros han desaparecido de gran parte de los arroyos y ríos en los países industrializados y en desarrollo.

Organismos dañinos

No hay duda de que ciertas enfermedades víricas están implicadas en el colapso de las colmenas, y que el ácaro varroa, parásito de las abejas de la miel, es responsable de la transmisión de algunas de ellas. Parásitos y patógenos han atacado siempre a especies de abejas y abejorros, pero no habían causado los índices de mortalidad que se observan hoy. Entre los factores que habrían agravado la situación se hallan el calentamiento global y la inhibición del sistema inmunitario de las abejas debido a dosis subletales de neonicotinoides y fipronil.

La introducción (accidental o deliberada) de animales y plantas foráneos produce a menudo la disminución de especies nativas. Casos bien estudiados son la introducción del pósum australiano en Nueva Zelanda, que es depredador de los escarabajos gigantes nativos de ese país, y la de la trucha arcoíris en Sudáfrica, que se alimenta de larvas de libélulas (algunas de las cuales ya están amenazadas de extinción).



PROPORCIÓN DE ESPECIES en declive, amenazadas (vulnerables y en peligro) y localmente extintas de los grupos taxonómicos estudiados.

Especies invasoras y la introducción de mariquitas foráneas para el control biológico de plagas agrícolas en los años 80 también ha afectado a ciertas especies nativas. Sin embargo, ese tipo de prácticas han madurado bastante en los últimos decenios y hoy pueden considerarse una solución ecológica para el manejo de especies invasoras y una alternativa poderosa a los plaguicidas.

Cambio climático

Los insectos de las zonas templadas suelen responder bien al ascenso de las temperaturas, pero los que viven en zonas tropicales no lo soportan. Quizá por esta razón los insectos de Puerto Rico han visto reducir sus poblaciones en números alarmantes, mientras que muchas mariposas europeas y americanas han expandido su distribución hacia el norte o en altitud en las montañas. El calentamiento global es responsable de estos desplazamientos, que podrían causar declives en algunas especies. La falta de humedad en el suelo podría afectar también a las larvas subterráneas de muchos insectos, aunque de momento no existen suficientes datos que lo confirmen.

¿Qué podemos hacer?

Puesto que la agricultura intensiva va acompañada del uso de abonos y plaguicidas que perjudican seriamente a la entomofauna, se necesita un cambio drástico de las prácticas actuales para remediarlo. Hay que restablecer los hábitats naturales en las zonas agrícolas, aplicar estrategias agroecológicas (como los abonos orgánicos y las rotaciones), usar controles biológicos efectivos de plagas y reducir de forma drástica el empleo de insecticidas. En definitiva, es necesario fomentar una transición hacia una agricultura sostenible que trabaje con la naturaleza y no contra ella, donde los productos tóxicos se usen solo como un último recurso y se prioricen los de origen orgánico. En este tipo de agricultura, que resulta tan o más productiva que la intensiva y aumenta los beneficios económicos, los insectos se convierten en aliados de los agricultores, en lugar de ser sus enemigos.

***Francisco Sánchez-Bayo**, ecólogo y ecotoxicólogo, es investigador de la Escuela de Ciencias Biológicas y del Medioambiente de la Universidad de Sídney. **Kris A. G. Wyckhuys**, entomólogo de la Universidad de Queensland, dirige la empresa para el control biológico de plagas Chrysalis, en Hanói.*

PARA SABER MÁS

Biodiversity: the ravages of guns, nets and bulldozers. Sean L. Maxwell et al en *Nature*, vol. 536, págs. 143-145, agosto de 2016.
Climate-driven declines in arthropod abundance restructure a rainforest food web. Bradford C. Lister y Andrés Garcia en *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 115, n.º 44: E10397-E1040, octubre de 2018.
Were the sharp declines of dragonfly populations in the 1990s in Japan caused by fipronil and imidacloprid? An analysis of Hill's causality for the case of *Sympetrum frequens*. Kosuke Nakanishi, Hiroyuki Yokomizo y Takehiko I. Hayashi en *Environmental Science and Pollution Research International*, vol. 25, n.º 35, págs. 35.352-35.364, diciembre de 2018.
Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. Francisco Sánchez-Bayo y Kris A. G. Wyckhuys en *Biological Conservation*, vol. 232, págs. 8-27, abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La silenciosa pandemia de las abejas. Aránzazu Meana, R. Martín Hernández y Mariano Higes en *IyC*, octubre de 2009.
El valor de los polinizadores. Leonardo Galetto, Lucas A. Garibaldi y Marcelo A. Aizen en *IyC*, agosto de 2018.

QUÍMICA

Un paso más cerca de los plásticos verdaderamente reciclables

Los plásticos termoestables ofrecen numerosas aplicaciones, pero no pueden remoldearse ni reciclarse. Una nueva versión de estos polímeros admite el reciclado y conserva las propiedades útiles

CORALIE JEHANNO Y HARITZ SARDON



GETTY IMAGES/KARL-FRIEDRICH HOHL/ISTOCK

LA DIFICULTAD PARA RECICLAR la mayor parte de la producción mundial de plásticos constituye un grave problema ambiental y económico. Urge el desarrollo de nuevos materiales más sostenibles.

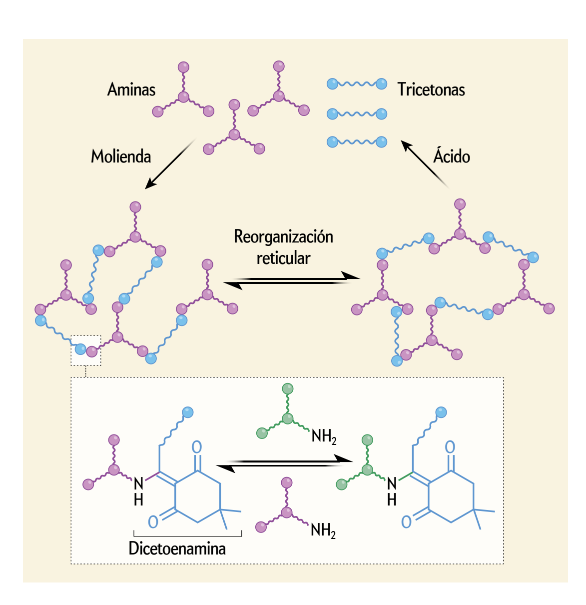
La mayoría de los plásticos que se emplean en la actualidad no pueden reciclarse fácilmente. Ello genera graves problemas ambientales, provoca cuantiosas pérdidas económicas a nivel mundial y agota recursos naturales finitos. Entre los plásticos más extendidos, destacan los termoestables. Revisten gran interés en aplicaciones de alto rendimiento, pero resultan poco prácticos en cuanto a su reutilización, ya que no pueden reprocesarse con calor o disolventes. En un artículo publicado en *Nature Chemistry* en abril, Peter R. Christensen, del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, y sus colaboradores refieren materiales termoestables formados mediante enlaces covalentes de dicetoenaminas, que tienen la capacidad de reubicarse dentro de la red polimérica. Sorprendentemente, las dicetoenaminas permiten que estos plásticos sean reciclados mediante un proceso de bajo consumo energético que regenera los monómeros prístinos, los cuales se reciclan para producir materiales termoestables casi idénticos a los originales.

Los plásticos comunes son polímeros que se diseñan para sobrevivir a los envites ambientales de la luz, el agua, el calor, etcétera. Sin embargo, esta resistencia también dificulta su reciclado. En principio, los plásticos de uso más extendido podrían reutilizarse, pero su procesamiento resulta costoso, requiere mucha energía y, por lo general, da lugar a materiales de baja calidad. De ahí que el rendimiento de los plásticos reciclados suela ser peor que el de un polímero sintetizado a partir de reactivos vírgenes.

Los materiales termoestables son especialmente problemáticos porque las moléculas de polímero se entrecruzan de

forma permanente mediante enlaces covalentes. Esta reticulación se traduce en una mayor resistencia a los disolventes y en mejores propiedades termomecánicas que las que presentan los termoplásticos (una familia de polímeros que carecen de enlaces intermoleculares fuertes). De ahí que los materiales termoestables posean un gran atractivo para aplicaciones en automoción o en dispositivos electrónicos que han de soportar altas temperaturas. En la actualidad representan entre el 15 y el 20 por ciento de la producción mundial de plásticos. Sin embargo, el hecho de que su forma permanezca invariable y no sean reciclables ni fundiéndolos ni disolviéndolos supone un gran inconveniente.

En consecuencia, los investigadores están tratando de crear materiales termoestables que puedan reciclarse o remoldearse con bajo coste energético sin comprometer su excelente resistencia química y térmica. Una idea consiste en crear redes de polímeros reorganizables. Un plástico de estas características mantendría las propiedades deseables de los termoestables en la mayoría de las condiciones y, además, podría moldearse de nuevo.



LOS ENLACES COVALENTES DINÁMICOS permiten recuperar monómeros de una red de polímeros. Los investigadores han sintetizado una red polimérica en la cual las moléculas se entrelazan mediante dicetoenaminas. El polímero, que se produce moliendo dos monómeros (compuestos de amina y tricetona), pertenece a la valiosa familia de plásticos termoestables. Los enlaces pueden redistribuirse dentro del polímero porque los grupos amina (NH_2) de distintas moléculas reaccionan con los grupos dicetoenamina. Cuando el polímero se trata con un ácido fuerte, los monómeros pueden recuperarse y usarse para volver a formar el polímero.

Por ejemplo, en la última década se han estudiado de manera intensiva los materiales termoestables conocidos como vitrímeros, que exhiben la fluidez del vidrio (ello se debe a que poseen enlaces covalentes capaces de reoganizarse a temperaturas elevadas, lo que les permite fluir). De este modo, mediante métodos térmicos, los vitrímeros pueden cambiar de forma y finalmente reprocesarse como si fueran termoplásticos. Sin embargo, a causa de las altas temperaturas que se requieren durante el reprocesamiento, estos materiales termoestables dinámicos tienden a degradarse en cada ciclo de uso, lo cual reduce su utilidad.

Algunos termoestables se han diseñado para que se descompongan a bajas temperaturas en condiciones ácidas. Ello permite que los plásticos se utilicen en ciclos cerrados (en los que, tras la despolimerización, los monómeros se recuperan y se reutilizan para volver a formar el plástico).

Sin embargo, se necesitan más estudios para desarrollar polímeros que den lugar al cien por cien de monómero tras su descomposición, así como para mejorar la durabilidad química, adaptar los procesos a escala industrial y hallar formas de despolimerizar los termoestables presentes en mezclas heterogéneas de residuos plásticos.

En su búsqueda de materiales aptos para el uso en ciclos cerrados, Christensen y sus colaboradores diseñaron polímeros que forman redes entrecruzadas dinámicas basadas en enlaces de dicetoenamina. Las redes se generan mediante un proceso versátil casi espontáneo, sin necesidad de disolventes, que en principio podría utilizarse para producir numerosos materiales análogos. Se ha demostrado que los grupos cetoenamina —que difieren de las dicetoenaminas por tener solo un grupo carbonilo (CO) en lugar de dos— se reorganizan dentro de la red polimérica, lo que permite el remoldeado.

Un trabajo previo había confirmado que las redes poliméricas que contienen cetoenaminas son estables en condiciones ácidas, pero Christensen y sus colaboradores hallaron que, inesperadamente, su red de dicetoenaminas podía descomponerse en sus monómeros constituyentes al tratarla con un ácido fuerte. El proceso dura menos de 12 horas y ofrece rendimientos excelentes; la diferencia en la reactividad se asocia con la presencia del grupo CO adicional en los entrecruzamientos de dicetoenamina. Los autores descubrieron que los monómeros podían recuperarse con un procedimiento sencillo desde el punto de vista operacional y que podían reutilizarse para crear termoestables con propiedades casi idénticas a las del material de partida.

A continuación, el equipo de Christensen llevó a cabo la despolimerización del nuevo material en presencia de otros plásticos y aditivos ampliamente utilizados (como fibra de vidrio, colorantes o retardantes de llama), que a menudo se encuentran en los residuos plásticos que se recogen para reciclar. No se observó contaminación en los monómeros recuperados, lo que demostraba que la reacción tolera numerosos y distintos aditivos. Este constituye un hallazgo de especial interés, pues sugiere que el método de despolimerización podría emplearse para reciclar plásticos reforzados con fibras, brindando una solución a uno de los mayores desafíos planteados en este campo.

Este último trabajo abre nuevas vías de investigación sobre la preparación de materiales termoestables totalmente reciclables, pero también suscita interrogantes científicos y técnicos. Por ejemplo, Christensen y sus colegas llevaron a cabo sus reacciones de polimerización a escala de gramos, pero ¿son viables a escala industrial? Además, dado que los autores necesitaron grandes cantidades de agua ácida y básica para purificar y reutilizar los monómeros, ¿será el proceso a escala industrial respetuoso con el ambiente?

Para facilitar la transferencia del laboratorio a la industria, las redes de polímeros dinámicas deberían aplicarse ahora a termoestables de uso generalizado, como poliuretanos, poliésteres y resinas epoxi. Hará falta una colaboración entre los ámbitos académico e industrial para definir los costes y beneficios de los plásticos de nueva generación en comparación con los polímeros actuales, así como para analizar su ciclo de vida. Será necesario que los químicos trabajen de forma rutinaria con científicos de otros campos para evaluar las consecuencias

del ciclo de vida completo de los productos sintetizados.

El desarrollo de materiales robustos que combinen una excelente resistencia química y térmica con una sobresaliente capacidad de reciclado podría servir de gran ayuda a la transición del actual modelo lineal de producción y consumo de plásticos —en el que se emplean recursos limitados para fabricar productos con una vida útil finita que luego se desechan— a una economía circular y sostenible que minimice los residuos y maximice el uso de recursos. Los plásticos de nueva generación tendrán que ser compatibles con los ciclos de vida cerrados para satisfacer de manera sostenible las expectativas de la creciente población mundial. En el ínterin, trabajos como el de Christensen y sus colaboradores nos acercan enormemente a los plásticos con un impacto ambiental mínimo.

Coralie Jehanno *desarrolla su doctorado en el instituto de materiales poliméricos POLYMAT, de la Universidad del País Vasco.* ***Haritz Sardon*** *es investigador Ikerbasque en POLYMAT.*

PARA SABER MÁS

Construction of crystalline 2D covalent organic frameworks with remarkable chemical (acid/base) stability via a combined reversible and irreversible route. Sharath Kandambeth et al. en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 134, núm. 48, págs. 19524-19527, noviembre de 2012.
Recyclable, strong thermosets and organogels via paraformaldehyde condensation with diamines. Jeannette M. García et al. en *Science*, vol. 344, núm. 6185, págs. 732-735, mayo de 2014.
Vitrimers: permanent organic networks with glass-like fluidity. Wim Denissen, Johan M. Winne y Filip E. Du Prez en *Chemical Science*, vol. 7, págs. 30-38, 2016.
Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent diketoenamine bonds. Peter R. Christensen et al. en *Nature Chemistry*, vol. 11, págs. 442–448, abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Plásticos ultraduros reciclables. Rachel Nuwer en *IyC*, febrero de 2015.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 568, págs. 467-468, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

NEUROCIENCIA

La mente de dos gusanos

Se obtienen los mapas de conectividad del sistema nervioso completo de dos nematodos de distinto sexo

DOUGLAS S. PORTMAN

En biología, la función sigue a la forma. La estructura de un ala proporciona información sobre el vuelo; la anatomía del pulmón sugiere mecanismos para el intercambio de gases. Al aplicarlo al cerebro, sin embargo, este enfoque flaquea. La consistencia gelatinosa y uniforme del cerebro de los mamíferos oculta una complejidad celular casi inconcebible: miles de millones de células (las neuronas), al interaccionar a través de billones de conexiones (las sinapsis), forman circuitos que perciben estímulos, almacenan recuerdos y generan emociones. ¿Y si tuviéramos un mapa completo de dichas conexiones? ¿Nos ayudaría a entender cómo funciona el cerebro? Esta es la premisa de la «conectómica», la identificación sistemática de todas las conexiones en un sistema nervioso. En un artículo reciente publicado en *Nature*, Steven J. Cook, del Colegio de Medicina Albert Einstein, en Nueva York, y sus colaboradores presentan los conectomas completos de dos individuos de distinto sexo de un minúsculo gusano, *Caenorhabditis elegans*. Se trata de un avance importante para comprender cómo la función del cerebro emerge a partir de su forma.

Mucho antes de que la palabra *conectómica* se pronunciara por vez primera, las ideas subyacentes a ella ya eran evidentes para Sydney Brenner, quien en la década de 1960, como es bien sabido, decidió «domesticar» a una criatura de cuyo sistema nervioso pudiera establecerse un mapa completo. Brenner se puso a trabajar sobre el nematodo milimétrico *C. elegans*. Su sistema nervioso contiene solo unos cuantos centenares de neuronas, cuya posición y estructura general son idénticas entre individuos. A pesar de su simplicidad, dicho sistema controla conductas instintivas complejas, permite modificarlas en función de las necesidades del gusano y aprende asociaciones sencillas.

El gusano es lo suficientemente pequeño para imaginarse cortarlo en rodajas como a un minúsculo salami y, con infinita paciencia, rastrear la estructura de cada neurona y sus conexiones mediante imágenes microscópicas de las rodajas. Fue exactamente lo que se realizó, heroicamente, en las décadas de 1970 y 1980. El conectoma resultante, el primero de este tipo, se describió en un artículo clásico en 1986, conocido coloquialmente como *The mind of the worm* («La mente del gusano»). Lo siguieron importantes mejoras y los neurobiólogos han estado trabajando diligentemente para comprender cómo emerge el comportamiento a partir de los circuitos descritos.

Pero dicho conectoma se obtuvo solo para uno de los sexos, el hermafrodita (un individuo autofértil que se considera el equivalente femenino del gusano). Por lo tanto, las diferencias sexuales en las conexiones no quedron claras. Además, dado que el conectoma original se construyó manualmente, cabía la posibilidad de que contuviera algunos errores. Para abordar estos problemas, miembros del grupo de Cook desarrollaron previamente un *software* para reconstruir el conectoma de la cola de un gusano macho adulto, una zona que aloja circuitos que solo están presentes en el sexo masculino. Ahora, en su último trabajo describen el resto del conectoma masculino, incluido el anillo nervioso, la región de la cabeza

EL SISTEMA NERVIOSO del nematodo *Caenorhabditis elegans* ha sido objeto de estudio desde hace décadas por su relativa simplicidad. Ahora se han cartografiado todas las conexiones neuronales de dos individuos de distinto sexo.

GETTY IMAGES/HEITIPAVES/ISTOCK

donde tienen lugar los principales procesos de cálculo del gusano. No contentos con eso, también han reconstruido el conectoma completo del hermafrodita partiendo de cero, utilizando su *software* para reanalizar las micrografías originales de la década de 1980.

El conectoma a mayor detalle

El nuevo trabajo revela información rica y con muchos matices que conllevará avances en esta área en muchos aspectos. Mientras que los conectomas originales describían la simple presencia de cada una de las sinapsis, Cook y sus colaboradores otorgan a cada una de ellas una localización física y un peso (una medida indirecta de fuerza basada en el tamaño físico). Este nivel de detalle permitirá realizar un análisis y una modelización mucho más detallados de la función de los circuitos. Gracias a la sensibilidad del *software*, los investigadores también identifican miles de conexiones que anteriormente se habían pasado por alto en el hermafrodita. Mediante herramientas de la teoría de redes, aportan nuevas clasificaciones interesantes de grupos de neuronas en función de su conectividad. Al comparar las reconstrucciones de las zonas derecha e izquierda del gusano, que son en gran medida simétricas, los autores obtienen una estimación de la precisión de sus datos de conectómica, que ha resultado elevada.

Los nuevos conectomas también incluyen las señales salientes del sistema nervioso, una característica que no se había catalogado de forma rigurosa en ningún ser vivo. Se han descubierto así conexiones previamente desconocidas con el intestino, la epidermis y la gónada masculina, que, sin lugar a dudas, inspirarán nuevas ideas acerca de la fisiología y el metabolismo de los gusanos. Los autores también hallan una complejidad inesperada en el control de los músculos corporales, algo que puede obligar a los neurocientíficos a reconsiderar sus conocimientos acerca de cómo el movimiento emerge a partir de la función de los circuitos.

¿Y qué ocurre con las diferencias sexuales? El equipo de Cook ha detectado que numerosas conexiones (hasta un 30 por ciento) parecen tener distinta fuerza entre hermafroditas y machos. Tales diferencias ya habían sido observadas en la cola, donde optimizan el comportamiento copulatorio. Sin embargo, su preponderancia en la cabeza, donde la anatomía macroscópica del sistema nervioso es prácticamente equivalente entre ambos sexos, es sorprendente.

Los autores confirmaron algunas de estas diferencias mediante la visualización directa de sinapsis específicas en gusanos vivos. De esta forma, se demostró que el tamaño medio de ciertas conexiones es distinto en función del sexo, pero también que los rangos de tamaño pueden solaparse en gran medida. Así pues, como en otros sistemas, el sexo biológico puede impulsar mecanismos de desarrollo que dan lugar a tendencias y diferencias absolutas. Las variaciones sexuales identificadas no cambian radicalmente la estructura del conectoma, pero plantean preguntas fascinantes sobre el modo en que dichas variaciones modulan la toma de decisiones y el comportamiento.

Un mapa de posibilidades

El estudio presenta algunas limitaciones, ciertamente. Dado que la mayor parte de las regiones solo se reconstruyeron una vez, sigue sin conocerse cuál es el nivel

de variación entre individuos. Algunas de las características de los nuevos conectomas podrían proceder de experiencias pasadas específicas de los individuos utilizados como muestra. Otro aspecto que plantea dudas es el de los pesos sinápticos: no está claro en qué medida la fuerza de una conexión puede estar en proporción con su tamaño físico. Finalmente, aunque los conectomas incluyen muchas conexiones nuevas, también carecen de algunas que estaban presentes en las versiones anteriores. ¿Podemos considerar entonces que los nuevos conectomas están «completos»? No es solo una pregunta técnica, sino también filosófica.

Los nuevos conectomas ponen de manifiesto un aspecto espinoso acerca de los circuitos neuronales y de la propia promesa de la conectómica: deducir la función exclusivamente a partir de la estructura es un camino plagado de dificultades. Al representarlos gráficamente, los nuevos conectomas no se parecen con claridad a las redes neuronales artificiales ni a los esquemas de cableado de los dispositivos electrónicos simples; más bien se parecen a las telarañas que se ocultan en la parte trasera del armario de las escobas. La mayoría de las neuronas están extensamente interconectadas con muchas otras, de forma que dos neuronas cualesquiera están vinculadas a través de un camino muy corto. Aunque pueden identificarse patrones curiosos, no pueden detectarse con claridad circuitos diferenciados para respuestas conductuales específicas. Como otros autores han mencionado previamente, el conectoma solo es un mapa de posibilidades. Es probable que emerjan circuitos funcionales de forma espontánea a través de la modulación dinámica de sinapsis individuales. El conectoma muestra todas estas sinapsis simultáneamente, con lo que ofrece pocas indicaciones acerca de cuáles pueden estar activas en un momento dado.

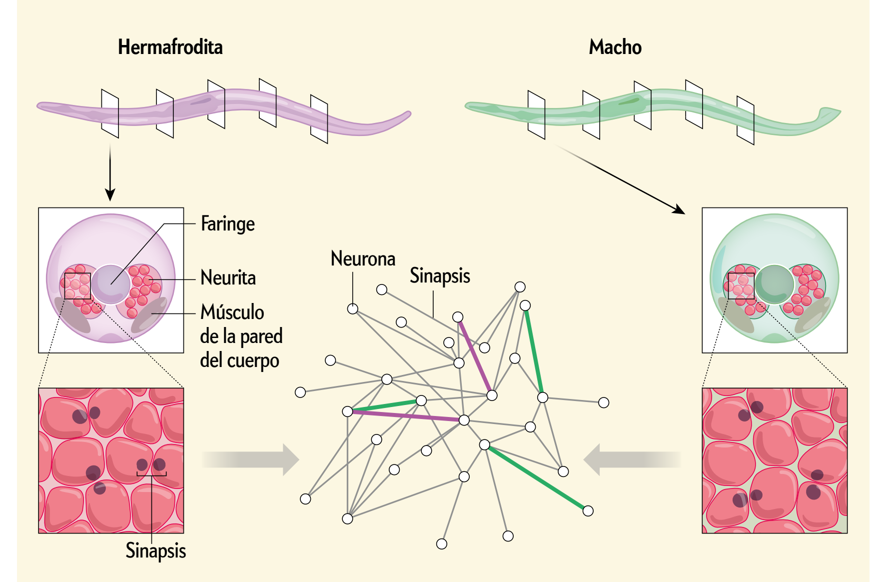
Por lo tanto, la estructura física del conectoma proporciona un conocimiento esencial del sistema nervioso, pero por sí sola es insuficiente para comprender el conjunto. Por fortuna, estrategias innovadoras que utilizan métodos de imagen podrían salvar el abismo entre la estructura de los circuitos y su función. Mediante la utilización de indicadores fluorescentes de actividad neuronal, en la actualidad es factible «observar» cómo las señales fluyen a través del sistema nervioso de un gusano que actúa libremente en tiempo real. La superposición de estos patrones de actividad en el conectoma debería aportar la información necesaria para comprender la forma en que la estructura del sistema nervioso limita su función. Esto, a su vez, nos acercará a la posibilidad de construir una simulación detallada del sistema nervioso, con lo que se generará un gusano virtual «vivo».

Algo así sigue estando lejos, pero solo si podemos simular con precisión y manipular de forma racional un sistema nervioso podremos empezar a comprenderlo. De nuevo, el minúsculo gusano de Brenner, con su posición única en una zona óptima, a medio camino entre la simplicidad y la complejidad, se sitúa en primera línea de los problemas más complejos de la biología.

Douglas S. Portman *trabaja en el Departamento de Genética Biomédica del Instituto de Neurociencia Del Monte de la Universidad de Rochester, en Nueva York.*

LA MENTE SEGÚN EL SEXO

EL CARTOGRAFIADO DETALLADO del sistema nervioso del nematodo *Caenorhabditis elegans* ha supuesto un importante avance hacia la identificación de los circuitos neuronales responsables de una función o conducta. Al compararse los sistemas de dos individuos, uno hermafrodita y otro macho, se han observado ligeras diferencias entre ambos sexos.



Se realizaron decenas de miles de secciones en serie que cubrían la mayor parte del cuerpo del gusano y de estas se obtuvieron imágenes microscópicas de alta y baja resolución. En ellas podían distinguirse los procesos neuronales y las conexiones sinápticas. Las imágenes se utilizaron para construir un conectoma, un mapa que muestra las conexiones entre todas las neuronas (*centro*). La mayoría de las conexiones están presentes en ambos sexos (*negro*), pero algunas solo se hallan en uno de ellos, o son más fuertes en uno que en el otro (*lila* y *verde*).

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 571, págs. 40-42, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The structure of the nervous system of the nematode *Caenorhabditis elegans*. John G. White et al. en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 314, n.º 1165, noviembre de 1986.

From the connectome to brain function. Cornelia I. Bargmann y Eve Marder en *Nature Methods*, vol. 10, págs. 483-490, mayo de 2013.

Whole-animal connectomes of both *Caenorhabditis elegans* sexes. Steven J. Cook et al. en *Nature*, vol. 571, págs. 63-71, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cien billones de conexiones. Carl Zimmer en *IyC*, marzo de 2011.

En la jungla de las neuronas. Jeff W. Lichtman et al. en *MyC*, n.º 84, 2017.

De las redes neuronales a la mente. Danielle S. Bassett y Max Bertolero en *IyC*, septiembre de 2019.

EL FUTURO

Ante un océano Ártico que se derrite, varios países han comenzado a pugnar por un terreno rico en recursos naturales cada vez más accesibles. ¿A quién pertenecen? ¿Cómo está cambiando la región? ¿Es inevitable el enfrentamiento?



DEL ÁRTICO

Mark Fischetti y Kathrin Stephen

Infografías de Katie Peek

ALEXANDER RYUMIN, GETTY IMAGES

MISIÓN DOBLE: El rompehielos ruso *50 Let Pobedy* despeja una vía de navegación. El barco también se emplea para llevar turistas a nuevos destinos en los que el hielo está desapareciendo. Ambas actividades aumentan a medida que los países aceleran el desarrollo del Ártico.


BERING
STRAIT
NORWEGIAN





¿A QUIÉN PERTENECE EL ÁRTICO?

Cinco países reivindican para sí vastas zonas del fondo oceánico parcialmente solapadas entre sí

Mark Fischetti

Ilustración de Peter Horvath

EL 2 DE AGOSTO DE 2007, TRES EXPLORADORES RUSOS SE INTRODUJERON en el interior de un sumergible bajo el grueso hielo marino del Polo Norte. Tras descender 4300 metros y alcanzar el fondo oceánico, desplegaron un brazo robótico y clavaron en los sedimentos una bandera rusa hecha de titanio. Después de emerger y regresar al rompehielos nuclear de apoyo, Artur Chilingárov, líder de la expedición y miembro del Parlamento, declaró a un periodista de la agencia rusa Itar-Tass que se hallaba a bordo: «Si dentro de cien o mil años alguien baja al punto donde nos encontrábamos, verá allí la bandera rusa». El presidente Vladimir Putin telefoneó al barco y expresó sus felicitaciones.

Al geofísico canadiense David Mosher no le impresionó la noticia cuando la escuchó en su despacho del Instituto Bedford de Oceanografía, en Nueva Escocia. Echó un vistazo a un pequeño fragmento cilíndrico de barro seco y denso que reposaba sobre su estantería: era el segmento de un testigo de



Mark Fischetti es redactor de *Scientific American* especializado en sostenibilidad.



sedimentos de unos 13 metros que había sido extraído de aquella misma área del fondo oceánico en 1991, cuando Mosher realizaba su doctorado en la Universidad Dalhousie, en Halifax. El investigador se había adentrado en la región junto con otros 40 científicos de todo el mundo en dos rompehielos procedentes de Alemania y Suecia. Con el fin de perforar el terreno y sacar la muestra de sedimento, enviaron al fondo marino un extractor de testigos. «Nosotros no colocamos ninguna bandera», repara Mosher. «Hicimos un agujero para que los rusos pusieran una.»

Colocar aquella bandera fue una hazaña política destinada sobre todo a levantar la moral rusa en un momento en el que el país atravesaba una profunda recesión. Pero la osada declaración sobre el Polo Norte dejó claro a los otros cuatro Estados con costas en el Ártico que había llegado el momento de reivindicar cualquier zona del fondo marino sobre la que se considerasen soberanos.

Uno de esos países, Noruega, iba en cabeza. Un año antes había entregado mapas y datos geológicos de tres secciones del fondo oceánico a la Comisión de Límites de la Plataforma Continental (CLPC), el órgano internacional que revisa este tipo de reivindicaciones y determina si los criterios científicos se han aplicado como deben. El reino de Dinamarca, que incluye Groenlandia, tardó unos años más, pero en 2014 entregó un voluminoso conjunto de documentos donde reclamaba una sección del fondo ártico de 900.000 kilómetros cuadrados. Rusia facilitó los suyos en 2015, con datos relativos a una extensión de 1,3 millones de kilómetros cuadrados (unas dos veces el tamaño de Francia) que se solapaba con más de la mitad del terreno reclamado por Dinamarca.

En mayo de este año, un equipo canadiense dirigido por Mosher, hoy profesor de geofísica en la Universidad de Nuevo Hampshire, entregó a la CLPC 2100 páginas de texto, coordenadas y medidas obtenidas con sónares, gravímetros y testigos de roca. Según esos datos, a Canadá le pertenecerían 1,1 millones de kilómetros cuadrados del fondo oceánico, correspondientes a un área que se superpone en gran medida con las reivindicadas por Rusia y Dinamarca. EE.UU., el quinto país con costas en el Ártico (a lo largo de Alaska), no presentará su propuesta al menos hasta 2022, pero se espera que su territorio se solape con el reclamado por Canadá.

Durante la mayor parte de la historia moderna, los países han considerado el océano Ártico como un bloque de hielo prácticamente inservible. Pero cuando comenzó su deshielo, se abrieron nuevas posibilidades. Un estudio realizado en 2008 por el Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. concluyó que los gruesos sedimentos del Ártico podían albergar el 30 por ciento de las reservas de gas todavía por descubrir del planeta, así como el 13 por ciento del petróleo y valiosos minerales de hierro y tierras raras. La retirada del hielo implicó la posible apertura y explotación de vías navegables. Vislumbrando un próspero futuro, cada uno de los cinco países se impacientó por asegurarse la mayor extensión de terreno posible. «Nadie sabe lo que puede ocurrir», afirma Flemming Getreuer Christiansen, subdirector del Servicio de Inspección Geológica de Dinamarca y Groenlandia.

La CLPC podría tardar años en revisar las solicitudes. Su lentitud se debe en parte a que se ocupa de 80 litigios similares

EN SÍNTESIS

Se estima que el fondo del océano Ártico alberga grandes reservas de gas, petróleo y minerales. Desde que el hielo ha empezado a derretirse, los países ribereños han comenzado a reclamar amplias secciones del suelo oceánico.

Debido a una legislación y a unos criterios geológicos poco claros, las zonas reivindicadas por Noruega, Rusia, EE.UU., Canadá y Dinamarca presentan grandes regiones comunes. Tres países reclaman para sí el Polo Norte.

Las fronteras podrían acabar definiéndose de manera metódica y basada en el consenso científico. Sin embargo, a la lentitud del proceso se suma una tensión geopolítica creciente, lo que podría desestabilizar la toma de decisiones.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES (*hielo*); EN ESTA PÁGINA: KIRILL KUDRYAVTSEV, GETTY IMAGES



CONSTRUCCIÓN DE TANQUES para almacenar gas natural licuado en el complejo Yamal LNG, parcialmente financiado por China y Francia y situado en el boyante puerto de Sabetta, en la costa ártica rusa. Las naciones ribereñas del Ártico están mostrando un interés cada vez mayor por las reservas de gas y el petróleo que alberga el fondo oceánico. Al mismo tiempo, otros países más alejados han puesto el foco en las inversiones.

en todo el mundo, desde Nicaragua hasta Ghana o Vietnam. No se espera que termine de evaluar las propuestas de Dinamarca o Rusia hasta dentro de unos años, y la de Canadá concluirá aún más tarde. Y la CLPC tampoco decide sobre terrenos que se solapan; de modo que, una vez completadas las revisiones, los países deberán iniciar procedimientos diplomáticos poniendo sobre la mesa las resoluciones de la CLPC y negociando líneas fronterizas, lo que sumará aún más tiempo.

El proceso de cartografiado y presentación de solicitudes ha sido de carácter civil, incluso cooperativo, y está sólidamente fundamentado en estudios geológicos. Pero su lento avance plantea un problema. Mientras que los científicos revisan metódicamente las exigencias de los distintos países, Putin expande sus bases militares a lo largo de la costa rusa. Sus discursos y acciones indican claramente que considera que su nación debería dirigir la región polar. Mientras tanto, los países de la OTAN refuerzan sus tropas en el norte, temerosos de que Rusia pudiera apoderarse del fondo oceánico del mismo modo que en 2014 se anexionó Crimea. Y, por si fuera poco, China está enviando barcos al norte para mostrar que también quiere desempeñar algún papel.

Históricamente EE.UU. ha prestado poca atención a la región, pero ahora comienza a hacer gala de su autoridad. En mayo, el secretario de Estado, Mike Pompeo, declaró en el encuentro del Consejo del Ártico, celebrado en Finlandia, que Rusia estaba actuando de forma agresiva y que había que vigilar de cerca a China. Por primera vez en 23 años, la reunión finalizó sin que los participantes firmaran una declaración de cooperación. Las diferentes posturas podrían tornar las negociaciones sobre fronteras en una cuestión controvertida, donde bandos opuestos desestimen la ciencia en lugar de emplearla como base para alcanzar un consenso. Y aún peor: puede que unos líderes obcecados pierdan la paciencia con la revisión de la CLPC y se apropien de lo que piensan que es suyo.



EL DESHIELO de los casquetes glaciares en regiones como el archipiélago noruego de Svalbard (*en la imagen*) y Groenlandia ha dejado al descubierto líneas de costa que pueden explotarse. Al mismo tiempo, el retroceso del hielo permite un mayor acceso al fondo oceánico y a rutas navegables que pueden aprovecharse durante épocas del año cada vez más largas.

MICHAEL NOLAN, GETTY IMAGES

CRITERIOS CIENTÍFICOS

Durante siglos, las naciones consideraron los océanos como una región salvaje. En el siglo XVII, algunas comenzaron a exigir derechos sobre las tres primeras millas de agua marina (4,8 kilómetros), tomando como criterio el máximo alcance de un cañonazo. La práctica continuó hasta el siglo XX, cuando los países empezaron a arrogarse derechos a varias distancias, lo que amenazaba el arraigado concepto de libertad asociado al mar abierto. Para resolver la cuestión, más de 160 países aprobaron en 1982 la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS). El tratado establecía que las naciones ribereñas de cualquier océano del planeta contarían con una zona económica exclusiva de 200 millas náuticas (370,4 kilómetros) medidas desde la costa. Cada país tiene todos los derechos sobre los recursos existentes tanto en esas aguas como en el correspondiente fondo oceánico. Las áreas situadas más allá se consideran aguas internacionales, de libre acceso para todos y propiedad de nadie.

Pero la convención dejó una puerta abierta. El artículo 76 recoge que un Estado puede reclamar la soberanía sobre el fondo oceánico situado más allá de esos 370,4 kilómetros si es capaz de demostrar que su plataforma continental (el fondo marino levemente en pendiente que se extiende desde la costa y se adentra en el océano antes de descender abruptamente hacia las profundidades) supera dicho límite. En esas áreas, las naciones tendrían derechos exclusivos sobre los recursos existentes en el suelo marino (aunque no en la columna de agua situada encima; es decir, la pesca y la navegación permanecerían abiertas). Los países del Ártico no prestaron especial atención a esta disposición hasta que el hielo comenzó a fundirse.

El artículo 76 contempla las normas que debe seguir un Estado para trazar los límites de su plataforma continental extendida. Por un lado, describe dos fórmulas para dibujar las líneas tan lejos como permitan las pruebas geológicas. Por otro, establece otras dos reglas para restringir dichas líneas, de forma que un país no pueda reclamar una extensión desproporcionada de océano.

Las dos fórmulas para trazar las líneas se basan en el contorno que marca el pie (la base) del talud continental. Imaginemos que nos encontramos en la costa mirando hacia el mar. El fondo oceánico desciende gradualmente a lo largo de muchos kilómetros, hasta que cae abruptamente por un talud y alcanza una profundidad notablemente mayor. Al llegar al final del talud, los científicos deben determinar su pie (el punto donde el cambio en la pendiente es máximo) alrededor de las líneas de costa y de las islas. Es en la obtención de estas pruebas «donde reside la ciencia», en palabras de Mosher.

Cada uno de los cinco países árticos se halla situado a lo largo del borde circular del océano Ártico, el cual podemos imaginar con forma de pastel. A medida que sus plataformas se extienden desde el perímetro hacia el centro, las piezas están destinadas a superponerse: las plataformas continentales llegan hasta donde les haya permitido la tectónica de placas.

La aplicación de las directrices mencionadas puede conllevar leves superposiciones. Pero otra disposición del artículo 76 genera un problema aún mayor. Esta contempla que una nación pueda reclamar para sí una porción aún mayor de fondo oceánico si este se halla a lo largo de una dorsal oceánica (una elevación submarina) que se extienda desde la plataforma continental del país. La longitud de la dorsal no importa; sin embargo, la disposición no define qué entiende por «dorsal». El lenguaje es «totalmente ambiguo», afirma Larry Mayer, director del Centro de Cartografía Costera y Oceánica de la Universidad de Nuevo Hampshire, exdirector de tesis de Mosher y considerado la mayor autoridad estadounidense sobre el fondo oceánico Ártico.

Esa ambigüedad permite que tanto los geólogos como los abogados de cada país interpreten los datos de distinta forma. El elemento que causa el mayor solapamiento entre Dinamarca,

Rusia y Canadá es la dorsal de Lomonósov, que se extiende a lo largo de 1800 kilómetros desde las islas rusas de Nueva Siberia hasta la isla canadiense de Ellesmere (muy cerca de Groenlandia) y divide el océano Ártico por la mitad. Algunos de sus picos se elevan 3500 metros por encima del fondo oceánico profundo. La dorsal es una reliquia gigante que data de hace millones de años, cuando los continentes norteamericano y euroasiático, entonces cercanos, comenzaron a alejarse uno del otro. La herencia compartida de la dorsal supone que tanto Dinamarca como Rusia y Canadá pueden alegar que se prolonga de forma natural desde sus respectivas plataformas continentales. El punto más relevante de esa zona en disputa es, de hecho, el Polo Norte.

Los científicos afirman que solo trazan los límites hasta donde les permite la geología. Pero sus equipos pueden también poner la ciencia al servicio de estrategias nacionales. Rusia podría haber delineado su plataforma continental extendida a lo largo de la dorsal de Lomonósov y cruzar así el océano Ártico hasta la zona económica exclusiva de 370,4 kilómetros de Canadá. Sin embargo, en su solicitud presentada a la CLPC, se detuvo justo pasado el Polo Norte. No ha especificado por qué. Cuando me puse en contacto con dos expertos de su equipo, Eugene Petrov y Yuri Firsov, declinaron concederme una entrevista aduciendo que las cosas eran «bastante complicadas». Rick Saltus, investigador principal de la Universidad de Colorado en Boulder y participante veterano de los estudios realizados por EE.UU., afirma que Rusia podría carecer de datos suficientes cerca del extremo canadiense de la dorsal. Reunir los detalles que precisa la CLPC presenta costes elevados.

Pero, según el experto, otra posibilidad es que Rusia se hubiera detenido en ese punto por una cuestión estratégica. ¿Para qué complicar futuras negociaciones con Dinamarca y Canadá? El largo segmento de la dorsal de Lomonósov reclamado por Rusia sería más que suficiente para explotar recursos.

Canadá ha adoptado una postura similar. Ha limitado la prolongación de la dorsal de Lomonósov que considera suya hasta poco más allá del Polo Norte, donde se solapa con el terreno delineado por Rusia. Sin embargo, Dinamarca reclama la dorsal desde Groenlandia hasta la zona económica exclusiva de Rusia, con lo que cruza todo el océano. «No consideramos que otros Estados pudieran reivindicar la misma área», comenta Finn Mørk, geofísico del Servicio de Inspección Geológica de Dinamarca y Groenlandia. Afirma que está abierto a negociar la manera de resolver los solapamientos; es decir, de decidir quién colocará finalmente la bandera en el Polo Norte.

¿CIENCIA O POLÍTICA?

Dada la vaguedad del artículo 76, las tres declaraciones referentes a la dorsal de Lomonósov podrían ser legítimas desde el punto de vista científico. Pero, en última instancia, decidir qué nación obtendrá los derechos de cada territorio no depende de los científicos, sino de los diplomáticos o, potencialmente, de los ejércitos. Una creciente tensión geopolítica podría acabar desplazando al ordenado proceso basado en recabar pruebas científicas.

Para empezar, la futura solicitud de EE.UU. implicará más solapamientos, lo que complicará las negociaciones. Su dimensión no saldrá a la luz hasta que se entreguen los documentos, algo que no ocurrirá hasta 2022 como pronto, explica Evan Bloom, director de asuntos polares y oceánicos del Departamento de Estado de EE.UU. y alto cargo del Proyecto para la Plataforma Continental Extendida de Estados Unidos. Mayer afirma que EE.UU. cuenta con todos los datos que necesita. «Simplemente se trata de un inmenso proceso de análisis», explica.

Sin embargo, EE.UU. podría hallarse en la posición más débil de la negociación, ya que, a diferencia del resto de los países árticos, nunca firmó la UNCLOS. Numerosos representantes de EE.UU. y varios presidentes han recomendado suscribirla, pero el recelo de varios senadores lo ha acabado impidiendo. Ahora, eso podría dañar la propia causa del país. «Ojalá EE.UU. supiera hasta qué punto queda en desventaja por no formar parte de la convención», afirma Galo Carrera, investigador marino de Dalhousie, cónsul honorario de México en Canadá y expresidente de la CLPC.

Como resultado, EE.UU. no necesita presentar ninguna alegación a la CLPC ni atenerse a su revisión. Pero, según Bloom, EE.UU. hará ambas cosas. Ha invertido 89 millones de dólares en reunir datos y quiere que el resto del mundo vea que sigue el mismo criterio que cualquier otro; algo que, en opinión de Bloom, concederá al país «una posición sólida» en futuras negociaciones. Y, realmente, tampoco existe otra forma de reclamar un terreno. El Gobierno estadounidense podría publicar un documento donde declarara que determinada sección del fondo oceánico es suya, pero el mundo no lo reconocería. Durante una negociación, sostiene Saltus, «cualquier país querrá tener la resolución de la CLPC en el bolsillo». De manera efectiva, EE.UU. reconoce la UNCLOS como derecho internacional consuetudinario; es decir, como la práctica legal que sigue el planeta.

La retórica de EE.UU. también complica la discusión desde el punto de vista político. El pasado junio, el Departamento de Defensa hizo pública su última Estrategia Ártica. Según esta, a pesar de la notable cooperación que ha existido hasta ahora entre las naciones árticas, se aproxima una «era de competencia estratégica» y una «vía potencial para la agresión».

Así podrían interpretarse las acciones de Rusia. Desde que el país irrumpió en Ucrania, sus relaciones con la OTAN se han tensado, recuerda Rob Huebert, profesor de ciencias políticas en la Universidad de Calgary y exdirectivo del actual Centro de Defensa, Seguridad y Estudios Estratégicos. La costa ártica brinda a Rusia una posición estratégica clave desde el punto de vista militar, especialmente en lo que se refiere a la disuasión de una guerra nuclear, puesto que posee importantes bases submarinas nucleares. Huebert señala que la política del Ártico no puede disociarse de una geopolítica más amplia a escala mundial, y sostiene que Putin «ve la expansión de la OTAN como la principal amenaza y no permitirá que ocurra». Opina que los aviones a reacción rusos sobrevuelan ahora Suecia y Finlandia porque ambos países consideran adherirse a la OTAN. El pasado mes de marzo, Suecia alojó en su región más septentrional amplias maniobras militares en las que participaron miles de soldados de la OTAN. Dado el despliegue ártico de Rusia, Curtis Scaparrotti, general del Ejército estadounidense, comunicó ese mismo mes al Senado del país que también EE.UU. debería aumentar sus actividades militares en el norte.

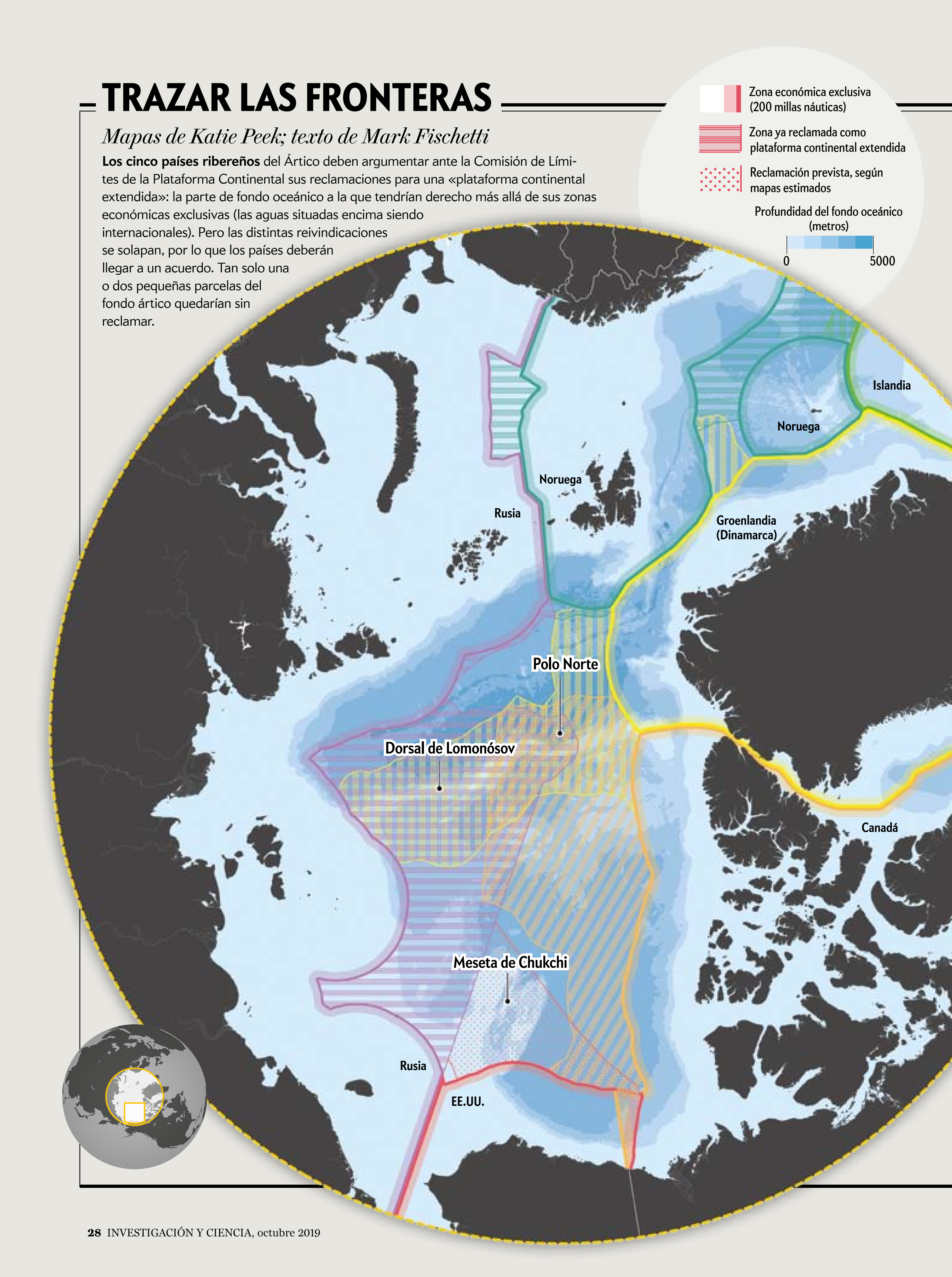
Más allá de la estrategia militar, el petróleo o el gas, Rusia podría tener otra razón para querer controlar una buena parte del Ártico. «Se trata de una cuestión de nacionalismo», afirma Andrew Holland, jefe de operaciones del Proyecto de Seguridad Americana, una organización independiente radicada en Washington. «“Somos los rusos; somos la potencia ártica y deberíamos tener los derechos sobre todo esto”.»

Otros expertos en geopolítica sostienen que se ha exagerado el potencial de una confrontación en el Ártico. Heather Exner-Pirot, experta del Centro de Investigación Interuniversitaria sobre las Relaciones Internacionales de Canadá y Quebec y editora de la publicación digital *Arctic Yearbook*, que analiza el estado

TRAZAR LAS FRONTERAS

Mapas de Katie Peek; texto de Mark Fischetti

Los cinco países ribereños del Ártico deben argumentar ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental sus reclamaciones para una «plataforma continental extendida»: la parte de fondo oceánico a la que tendrían derecho más allá de sus zonas económicas exclusivas (las aguas situadas encima siendo internacionales). Pero las distintas reivindicaciones se solapan, por lo que los países deberán llegar a un acuerdo. Tan solo una o dos pequeñas parcelas del fondo ártico quedarían sin reclamar.

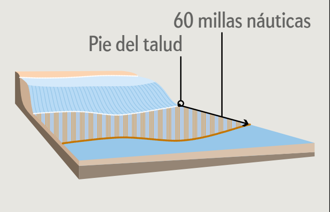


ASÍ RECLAMAN LOS PAÍSES

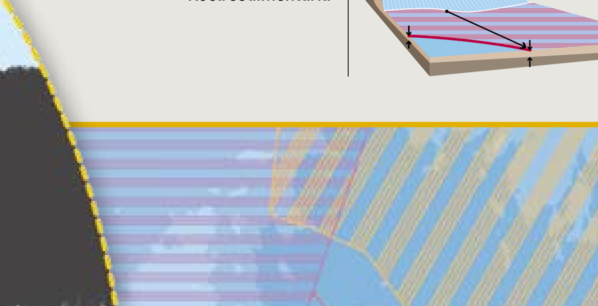
Cada nación debe justificar el margen externo de su plataforma continental extendida. Para ello emplea una de dos fórmulas existentes (A, B) basadas en el «pie» del talud continental. El trazado está limitado por el más favorable de dos límites posibles (C, D).

Fórmulas para trazar el margen externo

A Una línea a 60 millas náuticas desde el pie del talud



B Una línea donde el grosor de la roca sedimentaria es al menos un 1 por ciento de la distancia más corta al pie del talud

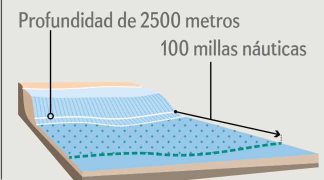


Límites del margen externo

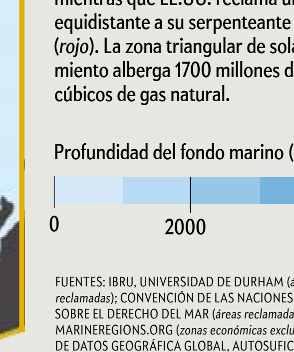
C Una línea trazada a 350 millas náuticas de la orilla



D Una línea trazada a 100 millas náuticas desde una profundidad del talud de 2500 metros



Margen final de la plataforma continental extendida



EL ROMPECABEZAS DE CHUKCHI

Resolver las reivindicaciones sobre el fondo oceánico exige un compromiso político y científico.

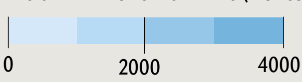
Una meseta maleable

Según cómo se interprete la separación de los continentes a lo largo del tiempo geológico, tanto Rusia como EE.UU. podrían alegar que la meseta de Chukchi es una «prolongación natural» de sus plataformas continentales. En 1990, la antigua URSS y EE.UU. negociaron una frontera marítima entre sus zonas económicas exclusivas (ZEE). Rusia mantuvo esa frontera al presentar su solicitud y no la sobrepasó; EE.UU. afirma que también se mantendrá fiel a ese límite.

Punto muerto económico

EE.UU. y Canadá discrepan sobre el límite de su ZEE. Canadá lo traza a lo largo del meridiano 141 (*línea naranja*), mientras que EE.UU. reclama una línea equidistante a su serpenteante costa (*rojo*). La zona triangular de solapamiento alberga 1700 millones de metros cúbicos de gas natural.

Profundidad del fondo marino (metros)

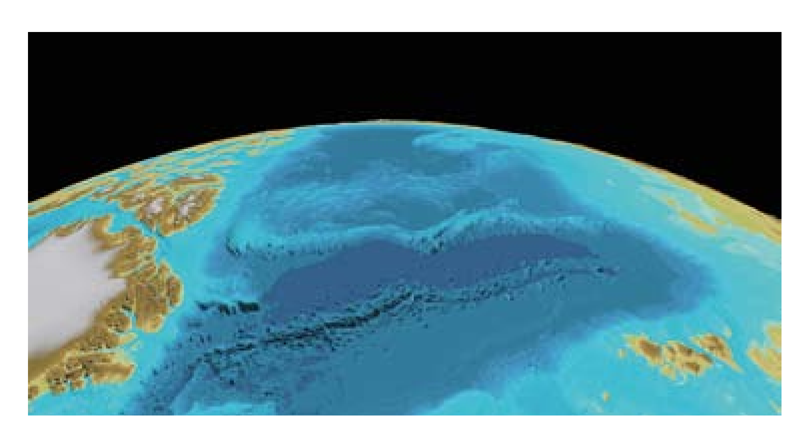


FUENTES: IBRU, UNIVERSIDAD DE DURHAM (*áreas reclamadas*); CONVENCIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DERECHO DEL MAR (*áreas reclamadas*); MARINEREGIONS.ORG (*zonas económicas exclusivas*); BASE DE DATOS GEOGRÁFICA GLOBAL, AUTOSUFICIENTE, JERÁRQUICA Y DE ALTA RESOLUCIÓN (*líneas de costa*); MAPA BATIMÉTRICO INTERNACIONAL DEL OCÉANO ÁRTICO, VERSIÓN 3.0 (*profundidades del fondo marino*)

de la política ártica, discrepa de Huebert, su antiguo director de tesis. «La gente piensa que hay rivalidad en el Ártico», opina. «Pero lo que en realidad hay es un oligopolio de cinco Estados. Están encantados.»

Los cinco países del Ártico plasmaron la situación en 2008 al suscribir la Declaración de Ilulissat, un acuerdo según el cual cada nación colaborará para salvaguardar el tráfico marítimo, prevenir vertidos de petróleo y resolver diferencias de forma pacífica. El convenio también estipula que los países bloquearán cualquier tentativa internacional para gobernar el Ártico, así como a cualquier otra nación que intente extraer petróleo o gas sin permiso. En el tratado no participó ningún otro país ni ninguna población indígena del Ártico.

Si las disputas entre las cinco naciones no ponen en peligro la resolución metódica de las reivindicaciones, existen dos circunstancias que sí podrían hacerlo. Una de ellas son las ambiciones económicas de China. En 2013, el presidente Xi Jinping desveló la Iniciativa del Cinturón y la Ruta de la Seda, ideada para crear una red económica entre numerosas naciones mediante la construcción de una amplia infraestructura en ellas. Hoy, China dirige proyectos valorados en cientos de miles de millones en más de 60 países. A algunos líderes mundiales les inquieta que el verdadero plan de Pekín sea dominar una enorme alianza en toda Asia. Parte de esa iniciativa se conoce como Ruta de la Seda Polar, destinada al desarrollo de rutas marítimas chinas a través del Ártico y al comercio con los países situados en ellas. En 2017, Xi celebró cumbres individuales con los líderes de las naciones árticas. Para no ser menos, Putin, que tiene su propia visión euroasiática, se reunió con cada uno de los líderes de Finlandia, Suecia, Noruega e Islandia durante el quinto Foro Internacional sobre el Ártico, celebrado el pasado abril en San Petersburgo.



LA DORSAL DE LOMONÓSOV (*banda clara central*) surca el fondo ártico desde Canadá y Groenlandia (*izquierda*) hasta Rusia (*derecha*). Los tres Estados argumentan que forma parte de su plataforma continental extendida.

La segunda circunstancia es Groenlandia. Esta isla ha sido territorio danés desde 1953. Y aunque Dinamarca le concedió el autogobierno en 2009, las elecciones groenlandesas de 2018 se convirtieron en un referéndum sobre la independencia. Lo que hasta ahora ha impedido la secesión es que sus casi 60.000 residentes, que pueblan de forma diseminada la isla más grande del mundo, dependen en gran medida de Dinamarca para subsidios y defensa. Pero, a medida que la nieve y el hielo se retiran, China invierte en los recursos minerales del territorio groenlandés. Otros países, incluido EE.UU., también están invirtiendo. Los groenlandeses consideran que podrían valerse por sí mismos, y Dinamarca ya le ha concedido a Groenlandia los derechos del fondo oceánico para explotar los recursos situados en la zona económica exclusiva alrededor de la isla.

Una Groenlandia independiente podría unirse a la OTAN; EE.UU. posee allí una base aérea. O bien podría asociarse con China o incluso con Rusia para explotar el terreno en proceso de deshielo. Si Groenlandia se convierte en un Estado independiente, Dinamarca podría transferirle su reivindicación de la plataforma continental desde la larga costa de la isla. En tal caso, las negociaciones sobre la plataforma podrían reestructurarse con Groenlandia como Gobierno, lo que abriría la puerta a más retrasos.

A LA ESPERA DEL DESENLACE

Pese a que eminentes científicos de los cinco países del Ártico no han querido pronunciarse acerca de las futuras negociaciones sobre los terrenos solapados, algunos parecen inquietos ante el ritmo al que progresa la CLPC. Nueve de ellos (como el canadiense Mosher, los estadounidenses Mayer y Saltus, el danés Mørk y los rusos Petrov y Firsov) intentan definir una base común del talud continental para todo el océano Ártico y están escribiendo un artículo para una revista científica. Llegado el momento, eso supondría una declaración de que los países han calculado de la misma manera sus correspondientes pies del talud, el fundamento técnico de las disposiciones. Ante tal consenso, la CLPC podría acelerar el proceso de revisión.

Si la CLPC aprueba las actuales exigencias de los cinco países, puede que solo quede una pequeña porción del océano Ártico sin reclamar. Según Saltus, ese espacio, conocido simplemente como «el Área», podría quedar reducido al tamaño de dos pequeñas parcelas de terreno en mar abierto. Pero tal vez el resto del mundo no quede muy satisfecho con ese resultado. En opinión de Carrera, las naciones árticas ven a veces el océano Ártico su patio particular, mientras que muchos otros países, así como las poblaciones indígenas, lo consideran un patrimonio global. Creen que tienen derecho a explorarlo en busca de recursos y a llevar a cabo investigaciones en la región.

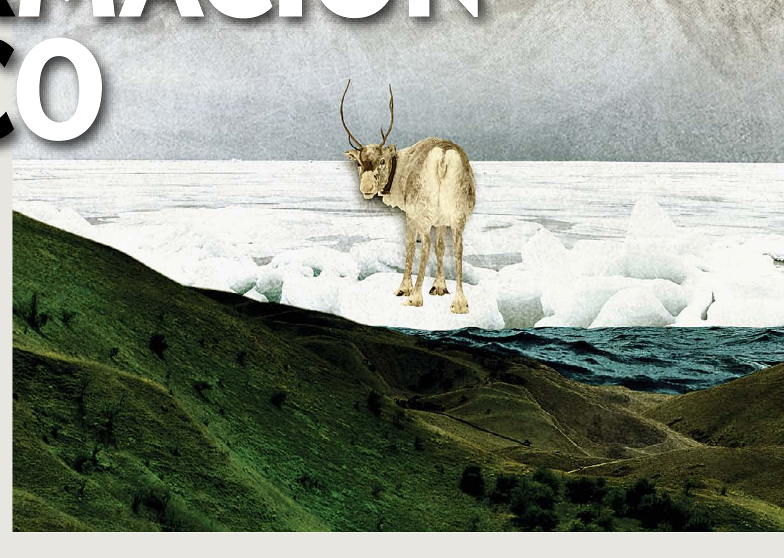
Algunos creen que el mundo debería establecer el océano Ártico como bien común. Como modelo, citan el Sistema del Tratado Antártico, el cual se halla en vigor desde 1961. Este reserva toda la tierra y las plataformas continentales como espacio científico, prohíbe las actividades militares y protege más de 20 millones de kilómetros cuadrados del océano Antártico. Pero en la Antártida no vive nadie, no hay Estados costeros, se halla en latitudes más remotas y el mar está más congelado. A medida que el Ártico se calienta, el que una vez fuera el hogar solitario de poblaciones indígenas que vivían de su naturaleza en lugar de dominarla se troceará y se explotará como el resto del mundo que se extiende hacia el sur. Lo que está en juego es si será la ciencia o será la política lo que guiará su desarrollo. IyC

PARA SABER MÁS

Geologic structures of the Arctic basin. Dirigido por Alexey Piskarev, Victor Poselov y Valery Kaminsky. Springer International Publishing, 2019.
Foro Internacional sobre el Ártico. San Petersburgo, 9 y 10 de abril de 2019: **forumarctica.ru/en**
Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar: **www.un.org/depts/los**

MARTIN JAKOBSSON, SCIENCE SOURCE

INFORME ESPECIAL
EL FUTURO DEL ÁRTICO



LA TRANSFORMACIÓN DEL ÁRTICO

El cambio climático está alterando drásticamente la vida en el norte del planeta

Mark Fischetti

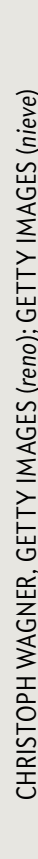
Ilustración de Peter Horvarth

En la isla de Banks, en los canadienses Territorios del Noroeste, más de 4000 deslizamientos de tierra descienden lentamente por las laderas a medida que el permafrost, en proceso de deshielo, se desmorona. En Siberia, el calentamiento del terreno causa que las filtraciones subterráneas de metano alcancen la superficie y provoquen explosiones que abren cráteres de hasta 40 metros de diámetro.

En todo el Ártico, los cambios drásticos se han convertido en la nueva norma, igual que las incursiones de los países y las actividades comerciales. La construcción, la extracción de petróleo y gas, el tráfico marítimo y el turismo están aumentando. El clima y la actividad humana están dejando huella tanto en la naturaleza como en los cuatro millones de personas que habitan en la región.

A medida que la interacción entre países aumente, la ciencia será fundamental para orientar acuerdos y políticas, sobre todo en lo referente a la prevención de desastres, la protección del entorno, las oportunidades económicas, la seguridad alimentaria, la salud humana y la resiliencia de las comunidades. Entre los expertos más valiosos figurarán las propias poblaciones indígenas. Llevan años observando de cerca los cambios térmicos y el retroceso de la cubierta de hielo, han caminado por montañas y bosques, han seguido a manadas de caribúes, han pescado en los mares y han mantenido la biodiversidad. Sus comunidades y sus culturas también serán las más afectadas por el desarrollo previsto.

Algunos líderes indígenas sostienen que el Ártico debería estar gobernado por organizaciones cooperativas y por normas que transciendan las fronteras políticas. Una planificación terrestre y marítima podría ayudar a asentar los derechos de la población, a proteger el entorno y a crear las condiciones para un diálogo constructivo. A fin de cuentas, opinan, el aprovechamiento sostenible del Ártico dependerá de que su entorno y sus comunidades gocen de buena salud.



TIERRA DE CAMBIOS ↓

TIERRA DE CAMBIOS

Mapas de Katie Peek; texto de Mark Fischetti

Los científicos se están quedando sin palabras para describir lo rápido que está cambiando el Ártico. El aumento de las temperaturas y la desaparición de la nieve y el hielo agravan los efectos. Los seres vivos, desde las algas y los árboles hasta los caribúes, están multiplicándose, luchando por sobrevivir o migrando. El proceso de mayor repercusión para la región y para el planeta tal vez sea el deshielo del permafrost, ya que podría liberar suficientes gases de efecto invernadero como para doblar un calentamiento global que ya está en curso.

La cima del mundo

El Ártico puede definirse de distintas maneras. Estos mapas siguen los esquemas internacionales del Consejo Ártico.

Cambios físicos

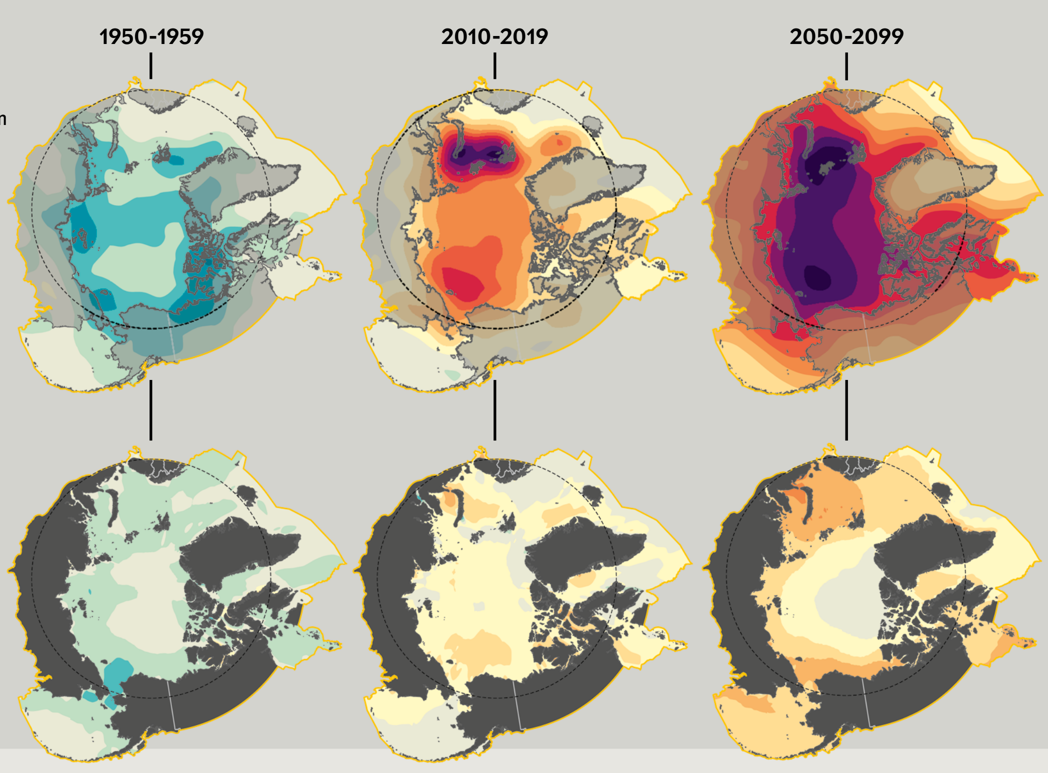
El aire, el mar y la tierra sufren rápidas transformaciones. Cada parámetro se cartografía a lo largo del mayor intervalo de tiempo para el que existen datos completos.

Un aire más caliente

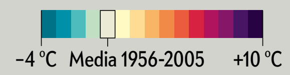
En esta década, las temperaturas medias atmosféricas durante el invierno han sido mucho más altas que durante los años cincuenta. Según los pronósticos, la segunda mitad de este siglo será aún más cálida.

Un océano más cálido

Las temperaturas estivales de la superficie oceánica han aumentado considerablemente; se pronostica que continuarán subiendo.



Anomalía térmica con respecto a la media 1956-2005:



La respuesta de la naturaleza

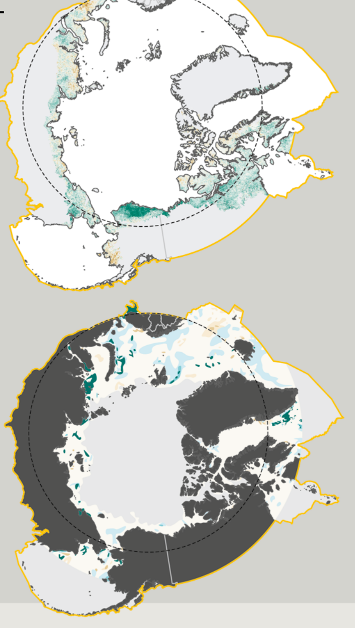
Todas las formas de vida se están adaptando a unas condiciones cambiantes.

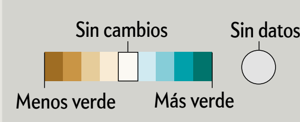
Reverdecimiento de la tundra

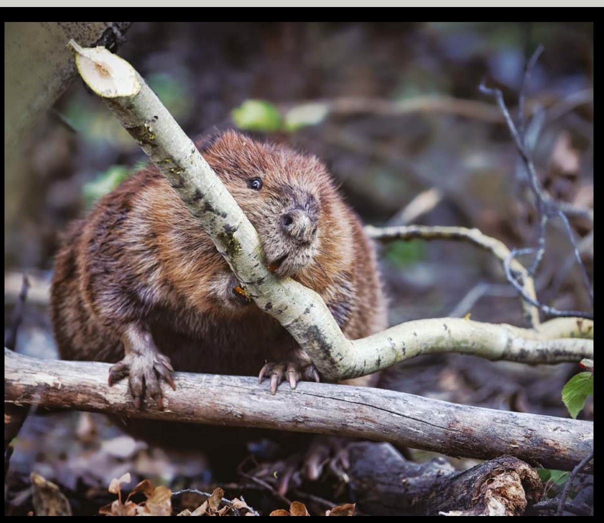
Las imágenes por satélite muestran, en función de la cubierta vegetal, la variación en el color verde y marrón de los terrenos entre 2017 y 1982.

Proliferación de algas

Unas aguas más cálidas y con menos hielo permiten la proliferación del fitoplancton. Su extensión, observada de color verde desde los satélites, era mayor en verano de 2017 que en verano de 2003.



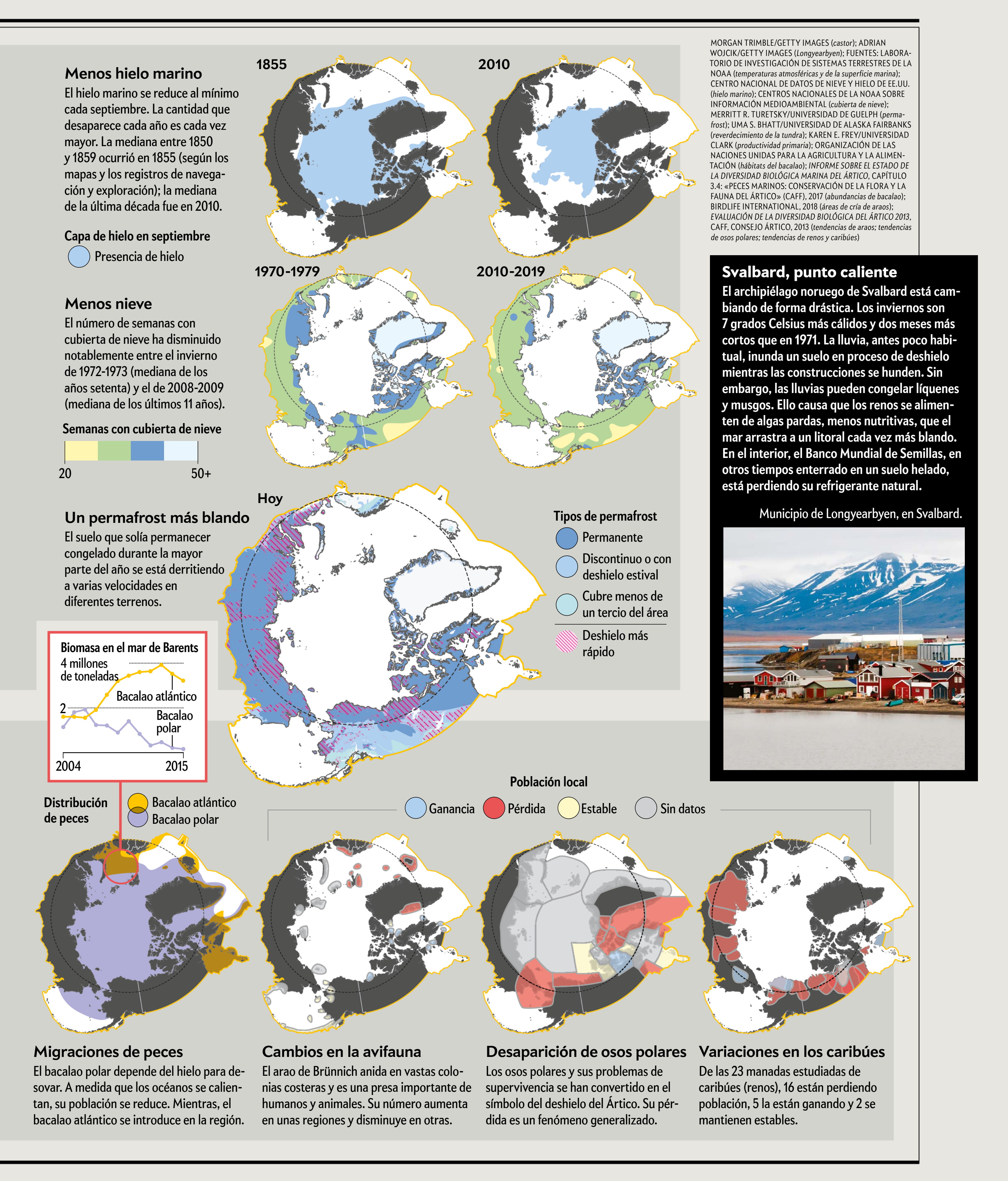




Castor norteamericano

El efecto castor

A medida que los árboles pueblan el norte, los castores los acompañan. Con la madera, los animales construyen presas que provocan pequeñas inundaciones. Estas derriten el permafrost, el cual libera CO_2 y metano. Los gases contribuyen al calentamiento, con lo que los árboles se expanden aún más hacia el norte. Ello atrae nuevos castores, y el ciclo comienza de nuevo.


MORGAN TRIMBLE/GETTY IMAGES (castor); ADRIAN WOJCIK/GETTY IMAGES (Longyearbyen); FUENTES: LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS TERRESTRES DE LA NOAA (temperaturas atmosféricas y de la superficie marina); CENTRO NACIONAL DE DATOS DE NIEVE Y HIELO DE EE.UU. (hielo marino); CENTROS NACIONALES DE LA NOAA SOBRE INFORMACIÓN MEDIOAMBIENTAL (cubierta de nieve); MERRITT R. TURETSKY/UNIVERSIDAD DE GUELPH (permafrost); UMA S. BHATT/UNIVERSIDAD DE ALASKA FAIRBANKS (reverdecimiento de la tundra); KAREN E. FREY/UNIVERSIDAD CLARK (productividad primaria); ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (hábitats del bacalao); INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA MARINA DEL ÁRTICO, CAPÍTULO 3.4: «PECES MARINOS: CONSERVACIÓN DE LA FLORA Y LA FAUNA DEL ÁRTICO» (CAFF), 2017 (abundancias de bacalao); BIRDLIFE INTERNATIONAL, 2018 (áreas de cría de araos); EVALUACIÓN DE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA DEL ÁRTICO 2013, CAFF, CONSEJO ÁRTICO, 2013 (tendencias de araos; tendencias de osos polares; tendencias de renos y caribúes)
Menos hielo marino
El hielo marino se reduce al mínimo cada septiembre. La cantidad que desaparece cada año es cada vez mayor. La mediana entre 1850 y 1859 ocurrió en 1855 (según los mapas y los registros de navegación y exploración); la mediana de la última década fue en 2010.
Capa de hielo en septiembre
Presencia de hielo
1855
2010
Menos nieve
El número de semanas con cubierta de nieve ha disminuido notablemente entre el invierno de 1972-1973 (mediana de los años setenta) y el de 2008-2009 (mediana de los últimos 11 años).
Semanas con cubierta de nieve
20
50+
1970-1979
2010-2019
Un permafrost más blando
El suelo que solía permanecer congelado durante la mayor parte del año se está derritiendo a varias velocidades en diferentes terrenos.
Hoy
Tipos de permafrost
Permanente
Discontinuo o con deshielo estival
Cubre menos de un tercio del área
Deshielo más rápido
Svalbard, punto caliente
El archipiélago noruego de Svalbard está cambiando de forma drástica. Los inviernos son 7 grados Celsius más cálidos y dos meses más cortos que en 1971. La lluvia, antes poco habitual, inunda un suelo en proceso de deshielo mientras las construcciones se hunden. Sin embargo, las lluvias pueden congelar líquenes y musgos. Ello causa que los renos se alimenten de algas pardas, menos nutritivas, que el mar arrastra a un litoral cada vez más blando. En el interior, el Banco Mundial de Semillas, en otros tiempos enterrado en un suelo helado, está perdiendo su refrigerante natural.
Municipio de Longyearbyen, en Svalbard.
Biomasa en el mar de Barents
4 millones de toneladas
2
Bacalao atlántico
Bacalao polar
2004
2015
Distribución de peces
Bacalao atlántico
Bacalao polar
Población local
Ganancia
Pérdida
Estable
Sin datos
Migraciones de peces
El bacalao polar depende del hielo para desovar. A medida que los océanos se calientan, su población se reduce. Mientras, el bacalao atlántico se introduce en la región.
Cambios en la avifauna
El arao de Brünnich anida en vastas colonias costeras y es una presa importante de humanos y animales. Su número aumenta en unas regiones y disminuye en otras.
Desaparición de osos polares
Los osos polares y sus problemas de supervivencia se han convertido en el símbolo del deshielo del Ártico. Su pérdida es un fenómeno generalizado.
Variaciones en los caribúes
De las 23 manadas estudiadas de caribúes (renos), 16 están perdiendo población, 5 la están ganando y 2 se mantienen estables.



RAZONES PARA LA COOPERACIÓN

La tensión política en el Ártico está en aumento, pero aún parece haber un amplio margen para evitar el conflicto

Kathrin Stephen

Ilustración de Peter Horvath

EL PASADO 28 DE MARZO, CINCO BOMBARDEROS B-52 ESTADOUNIDENSES estaban entrenando sobre el mar de Noruega, en el océano Ártico. También surcaban el cielo algunos cazas F-16 noruegos, como parte de unas maniobras de la OTAN en el norte de Suecia en las que participaban 10.000 soldados. De repente, dos bombarderos rusos Tu-160 cruzaron el mismo espacio aéreo. Sorprendida, Noruega azuzó a los F-16 para que siguieran a los intrusos.

Los Tu-160 continuaron en dirección al Reino Unido y después regresaron a su lugar de origen. Pero su aparición suscitó inquietud. Los bombarderos de EE.UU. y Rusia pueden transportar armas nucleares, y hacía menos de dos meses que ambos países habían anunciado su retirada del Tratado de Fuerzas Nucleares de Alcance Intermedio. Aunque los aviones de EE.UU. y Noruega no se habían adentrado en el espacio ruso, Rusia pudo haber interpretado las maniobras como una advertencia de que, llegado el caso, la OTAN podía llevar armas nucleares hasta su frontera. Así las cosas, tal vez el Ejército ruso quisiera recordarles la existencia de su fuerza aérea.

Es razonable preocuparse por el incremento de la tensión en el Ártico. El cambio climático ha aumentado la accesibilidad de la región, lo que la ha convertido en una prioridad política de los ocho Estados con fronteras terrestres o marinas más allá del círculo polar: Rusia, Finlandia, Suecia, Noruega, Islandia, Dinamarca (a través de Groenlandia), Canadá y Estados Unidos. Otros países influyentes, como el Reino Unido, Japón y China, han comenzado a prestar más atención a los nuevos beneficios que brinda un océano Ártico en proceso de deshielo. Según el Servicio de Inspección Geológica de EE.UU., la región podría albergar hasta el 13 por ciento del petróleo mundial aún por descubrir y el 30 por ciento del gas natural. Los países también han puesto la mira en el deshielo parcial de las rutas marítimas que cruzan el paso del Noreste, a lo largo de la costa rusa, y el del Noroeste, a través de la de Canadá, así como en las nuevas posibilidades de pesca.



EN SÍNTESIS

Varios indicios sugieren que la tensión geopolítica en el Ártico está creciendo. La OTAN ha comenzado a realizar maniobras en la zona y Rusia ha ampliado su presencia militar en la región.

Sin embargo, el conflicto no tiene por qué ser inevitable. Un análisis más pausado sugiere que las hostilidades tendrían un alto coste para todos los implicados.

Foros como el Consejo Ártico, formado por ocho países y en el que participan representantes de los pueblos indígenas de la zona, están contribuyendo al desarrollo pacífico de la región.



Kathrin Stephen es politóloga del Instituto de Estudios Avanzados de Sostenibilidad de Potsdam. Es también investigadora y redactora jefa en el Instituto Ártico—Centro de Estudios de Seguridad Circumpolar, una organización con sede en Washington.

Por encima de tales factores se encuentra el aparente deseo de Rusia de controlar la región. Bajo el mandato Vladimir Putin, el país ha efectuado importantes inversiones en sus bases militares y puertos en el Ártico, donde está estableciendo un sistema de alerta temprana de misiles. Por otro lado, emplea su flota de rompehielos para asegurar la maniobrabilidad durante todo el año. El pasado mayo botó el *Ural*, el primero de sus nuevos y enormes rompehielos nucleares LK-60.

Otros países ya están respondiendo. El Reino Unido ha anunciado una nueva Estrategia Ártica de Defensa. En febrero, EE.UU. destinó 675 millones de dólares a un robusto rompehielos polar. En marzo, la Marina estadounidense anunció que en verano enviaría múltiples buques. En abril, la Guardia Costera de EE.UU. publicó una nueva estrategia para aumentar las inversiones en el Ártico. Y un mes después, en la reunión de ministros del Consejo Ártico, el secretario de Estado de EE.UU., Mike Pompeo, criticó duramente a Rusia y a China por su agresivo comportamiento en la región. Tales acciones podrían reflejar el cambio hacia una política más firme para tratar de equilibrar la influencia rusa. Pompeo incluso insistió en la toma de decisiones unilaterales antes que en la cooperación.

Desde un punto de vista estratégico, el Ártico reviste capital importancia para Rusia y sus rivales. El poder disuasorio nuclear de Rusia se encuentra ligado a sus submarinos nucleares, y las principales bases del país se sitúan a lo largo de la costa ártica. La oleada de actividad ha suscitado el miedo a que un Ártico más accesible desemboque en una proverbial «guerra fría» en la región. Desde que Rusia se anexionara la península de Crimea en 2014, su relación con la OTAN ha sido tensa. La preocupación radica en que cada bando acabe empleando el Ártico como moneda de cambio en las negociaciones sobre otras zonas conflictivas, como Siria o Ucrania. En marzo, Rusia anunció que endurecería las exigencias a los barcos extranjeros que atravesaran la Ruta Marítima del Norte.

Para complicar la situación, cuatro de las cinco naciones con costas en el Ártico han reclamado, al abrigo de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS), los derechos para explotar sus plataformas continentales extendidas: la parte del fondo marino que consideran que les pertenece. Sin embargo, hay grandes áreas que se solapan, sobre todo entre Rusia, Dinamarca y Canadá. Rusia ha seguido de cerca los procedimientos de la UNCLOS porque, dada su alargada línea de costa y su extensa y somera plataforma continental, tiene mucho que ganar. Pero si los países no son capaces de resolver sus reclamaciones por medios políticos, Rusia podría jugar de forma menos amable y preparar al Ejército para actuar.

MOTIVOS PARA EL SOSIEGO

Pero el conflicto no es inevitable. Las naciones árticas cuentan con buenas razones para cooperar, y algunos de sus movimientos podrían ser menos agresivos de lo que parecen. Por ejemplo, debido a las duras condiciones, muchas tareas civiles, como la prospección de petróleo o la vigilancia del tráfico marítimo, solo pueden hacerse con equipamiento y personal militar.

Por otro lado, los líderes rusos son muy conscientes de que un conflicto abierto podría dar al traste con el petróleo y el gas de la región, ya que su explotación depende en gran medida de agentes internacionales, como naciones y empresas occidentales. La extracción de recursos presenta, aun en ausencia de hielo, costes elevados y dificultades técnicas. La construcción del proyecto ruso de gas natural licuado Yamal LNG, desarrollado cerca de la costa y parcialmente en alta mar, costó 27.000 millones de dólares. Rusia se mostró reacia a financiarlo en solitario, así que buscó apoyos en Francia y China.

El país depende de financiación y de técnicos extranjeros. Ello supone un acicate para su moderación, sobre todo en aquellas áreas del fondo marino reivindicadas por varios países. Rusia y Noruega tienen un gran interés en los recursos de alta mar, por lo que deben crear un clima estable que anime a otras naciones a invertir. Ese era precisamente su objetivo en 2010, cuando, tras años de estancamiento, ambos países resolvieron en cuestión de semanas su conflicto fronterizo en el mar de Barents.

Ni siquiera el petróleo y el gas generan un gran debate. Rusia y Noruega son las únicas naciones realmente interesadas en esos recursos, ya que representan una fracción sustancial de sus exportaciones. EE.UU. y Canadá cuentan con yacimientos de combustibles fósiles mucho mayores y accesibles fuera del Ártico, como el petróleo del golfo de México, el gas de esquisto de EE.UU. y las arenas bituminosas de Alberta.

Además, la inmensa mayoría de las reservas previstas de petróleo y gas se hallan en las cinco zonas económicas exclusivas de las naciones ribereñas del Ártico. Estas se extienden hasta las 200 millas náuticas (370,4 kilómetros) de la costa y sobre ellas prácticamente no hay litigio, ya que la UNCLOS dictamina que

POBLACIONES

El Ártico humano

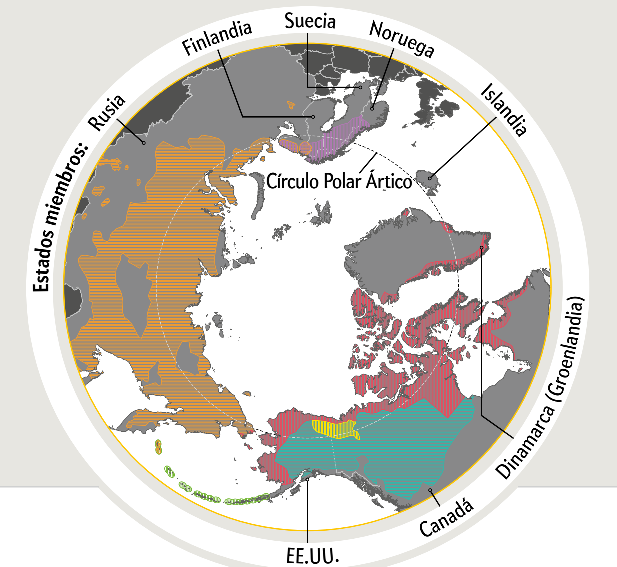
De los cuatro millones de habitantes del Ártico, unos 500.000 son indígenas. Estos se han organizado en seis grupos que, junto con ocho países, participan en el Consejo Ártico, un foro de cooperación. El mayor es la Asociación Rusa de Pueblos Indígenas del Norte, que representa a 244.000 individuos.







Miembros del Consejo Ártico:
Consejo Circumpolar Inuit
Asociación Rusa de Pueblos Indígenas del Norte
Consejo Internacional Gwich'in
Asociación Internacional Aleuta
Consejo Ártico Athabascano
Consejo Sami



PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES (*banderas, tanques, hielo y agua*)
EN ESTA PÁGINA: KATIE PEEK (*mapa*); FUENTES: PHILIPPE REKACEWICZ UNEP/GRID-ARENDAL

cada país posee el control de sus recursos. Es cierto que existen yacimientos de petróleo y gas en zonas más alejadas, donde las reivindicaciones territoriales sí se solapan. Sin embargo, dado que las normas de la UNCLOS apoyarían buena parte las aspiraciones rusas, hay pocos motivos para pensar que el país vaya a torpedear una resolución pacífica.

Y, sobre todo, para explotar los recursos, estos deben reportar algún beneficio. Un petróleo a 80 dólares el barril (un precio que no se ve desde octubre de 2014) podría justificar la explotación en algunas regiones de alta mar, pero no en aquellas más alejadas de las plataformas continentales extendidas. Un ejemplo es el yacimiento de gas de Shtokman, en la zona económica exclusiva de Rusia, en el mar de Barents. Descubierto en 1988, se trata de uno de los mayores yacimientos de gas del mundo, con unas reservas estimadas en 3,8 billones de metros cúbicos. A comienzos de siglo, Putin aseguró que Rusia lo explotaría. Pero con la revolución del gas de esquisto en EE.UU. y la cantidad de gas que invadió el mercado hacia 2010, el proyecto quedó aparcado. Toda reclamación de terreno ártico más allá de las zonas económicas exclusivas es principalmente simbólica. Su intención es asegurar el acceso a los recursos más distantes por si algún día se tornasen valiosos, no entrar en una «carrera» para explotarlos antes que otras naciones.

Tampoco parece probable un conflicto por las rutas marítimas árticas, ya que casi nadie cree que puedan competir con las rutas globales a través de los canales de Suez o de Panamá. La naturaleza estacional de los pasajes árticos (el hielo invernal aún persistirá durante años), sumada a las inclemencias climáticas y a una infraestructura que dificulta las travesías, reduce de manera considerable su relevancia.

En septiembre de 2018, la primera travesía de un carguero por la Ruta Marítima del Norte, realizada por la compañía danesa Maersk, se quedó en un intento aislado que no derivó en el inicio de rutas regulares. El director técnico de la compañía concluyó: «A día de hoy, no contemplamos la Ruta Marítima del Norte como una alternativa viable a las rutas ya existentes de este a oeste». El tráfico naval en latitudes altas podría servir para llevar material al puerto ruso de Sabetta y para transportar el gas natural de la región de Yamal, sobre todo en verano. Pero tales operaciones se circunscriben principalmente a barcos rusos, y son ajenas al comercio marítimo internacional.

Un buen número de países y empresas esperaban poder adentrarse en el Ártico para aumentar su pesca, ya que algunas especies están migrando hacia el norte. Sin embargo, los beneficios se antojan muy inciertos. En 2009, EE.UU. prohibió la pesca comercial en extensas áreas de su zona económica exclusiva en los mares de Chukchi y Beaufort, en las costas de Alaska, por carecer de datos sobre su sostenibilidad. En 2015, los cinco países ribereños del Ártico adoptaron una moratoria de facto a la pesca comercial en alta mar (más allá de sus zonas económicas exclusivas). Y en 2018, firmaron un acuerdo para prohibir la pesca comercial durante 16 años que también suscribieron Islandia, la UE, China, Japón y Corea del Sur. El objetivo principal es dejar tiempo para reunir datos científicos y poder diseñar una pesca comercial sostenible y ordenada.

LA PERCEPCIÓN DEL CONFLICTO

A la hora de evaluar la probabilidad de un conflicto, hay también que recordar que, históricamente, el Ártico ha sido un escenario de cooperación internacional. Los países de la zona, algunos ajenos a ella y los representantes de los pueblos indígenas han colaborado durante años. En 1991, los ocho Estados con territorios en el Ártico y sus poblaciones nativas adoptaron la Estrategia de Protección Ambiental del Ártico, la cual fomentaba la cooperación para vigilar y conservar el territorio. En 1996, aquel acuerdo llevó a la fundación del Consejo Ártico, hoy convertido en el foro de referencia de la región y en fuente de continuas iniciativas y decisiones conjuntas. En la actualidad incluye varias ONG, instituciones científicas y asociaciones de la ONU, y en 2018 estuvo nominado al premio Nobel de la paz.

El consejo ha recibido críticas por no tratar cuestiones militares y de seguridad, pero tales aspectos no forman parte de sus competencias. Y aunque sin duda hacen falta canales diplomáticos para abordar cuestiones de seguridad, el consejo no es el lugar adecuado. Los Estados ya han creado algunos de esos canales, como la Mesa Redonda sobre Fuerzas de Seguridad del Ártico o el Foro de Guardacostas del Ártico. Y para resolver los litigios relativos a la soberanía del fondo marino, los Estados deberán negociar de forma directa, como ya hacen con otras cuestiones espinosas.

El conflicto es a menudo una cuestión de percepción. Las estrictas normativas rusas para atravesar la Ruta Marítima del Norte pueden, de hecho, ser beneficiosas si suponen una navegación más segura y una mayor protección del entorno. La regulación de las vías marítimas próximas a las líneas de costa no es exclusiva de Rusia o del Ártico; los canales de Suez y de Panamá cuentan con una larga lista de reglas que los armadores deben cumplir. El mejor uso que se le podría dar al nuevo y robusto rompehielos polar de EE.UU., el único del que dispondría el país, sería mejorar el acceso a sus propias aguas árticas durante todo el año. Además, los rompehielos no son buques militares, y aunque lo fueran, un solo barco no supondría una amenaza para la gran flota de rompehielos rusos.

Algunas acciones de apariencia provocadora podrían responder a otros motivos. Para los pueblos indígenas y para muchos ciudadanos rusos, el Ártico es una parte fundamental de identidad, construida durante siglos de exploración y dominio del norte. Cuando, en 2007, una expedición rusa plantó una bandera en el fondo marino del Polo Norte, la hazaña no fue adueñarse de ese territorio, sino demostrar que el país podía llegar al punto más remoto del Ártico.

Por supuesto, y como en cualquier otro lugar del mundo, el conflicto siempre puede aparecer, quizá por razones inesperadas. Desde 2013, la flota china ha efectuado no menos de 22 travesías comerciales por el paso del Noreste, lo que supone uno de los mayores usos de dicha ruta por parte una nación que no sea Rusia. China también está tratando de convertir el Ártico en un escenario global. En enero de 2018, Pekín publicó un libro blanco titulado *Política ártica china*, donde declara que «la situación actual del Ártico va más allá de sus Estados originales o su naturaleza regional». Sin embargo, la llegada de China no implica que los riesgos sean mayores. Sus inversiones son bien recibidas por Rusia y Groenlandia. La cooperación económica podría fomentar la cooperación política y alzarse con el triunfo. IyC



PARA SABER MÁS

Consejo Ártico: **arctic-council.org**

Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar: **www.un.org/depts/los**

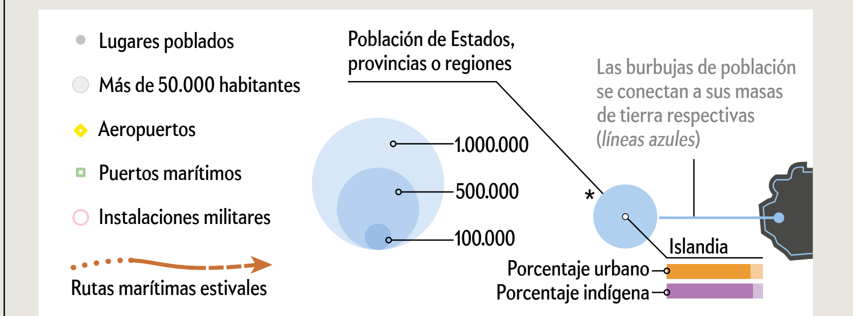
EN NUESTRO ARCHIVO

Las guerras del calentamiento global. Andrew Holland en *IyC*, agosto de 2016.

UN NORTE AJETREADO

Mapas de Katie Peek; texto de Mark Fischetti

A medida que el Ártico se deshiela, se torna mucho más accesible. Un estudio del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. estimó en 2008 que la zona alberga el 13 por ciento (90.000 millones de barriles) del petróleo mundial todavía por descubrir y el 30 por ciento (47 billones de metros cúbicos) del gas natural aún por extraer (*mapa*). Cerca de la mitad del océano Ártico tiene menos de 500 metros de profundidad, un fondo fácil de alcanzar si no hay hielo. Algunos países, especialmente Rusia, están construyendo numerosos aeropuertos, puertos marinos y otras infraestructuras, así como instalaciones militares.



Recursos naturales

Provincias geológicas que probablemente contengan al menos un yacimiento por descubrir de 50 millones de barriles de petróleo, o el equivalente de gas natural, y extraíble con la tecnología actual.

- 100 por cien probable
- 50-100 por cien
- 30-50 por cien

Seis provincias podrían contener el 75 por ciento del petróleo aún por descubrir; cuatro podrían contener el 70 por ciento del equivalente en gas natural.

Petróleo (90.000 millones de barriles en total)

Gas natural (equivalente a 412.000 millones de barriles de petróleo)

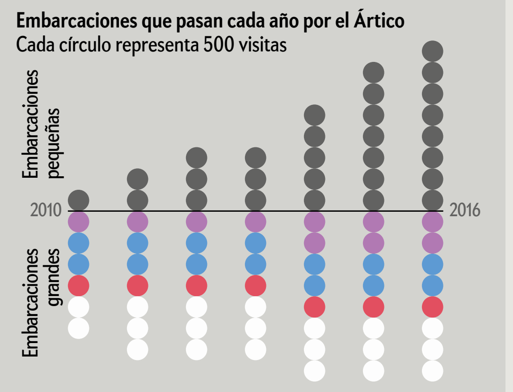
Petróleo	Provincia	Gas natural
	Cuenca de Siberia occidental	1
1	Alaska ártica	2
2	Cuenca de Amerasia	
3	Cuencas del rift de Groenlandia oriental	
4	Cuencas del Barents oriental	3
5	Groenlandia occidental – Canadá oriental	
6	Cuenca de Yenisey-Khatanga	4
	Otras	

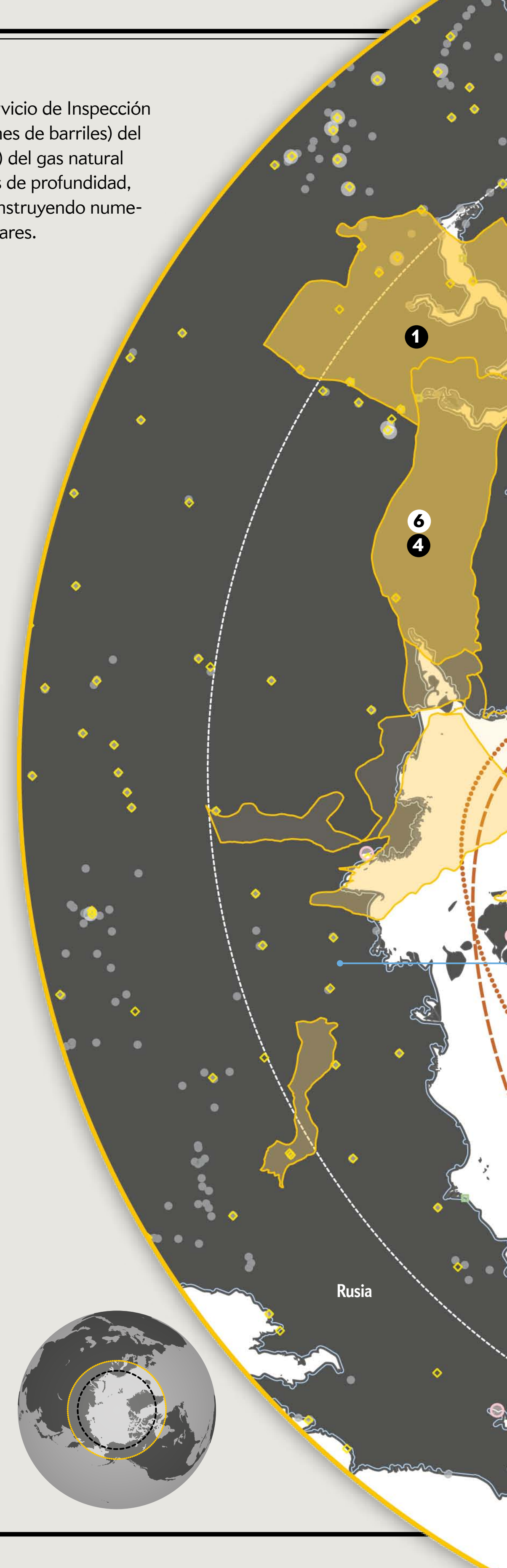
Más tráfico marítimo

Los grandes barcos deben ondear la bandera del país donde están registrados; no ocurre así con las embarcaciones menores.

Banderas izadas en grandes embarcaciones

- Rusia
- Noruega
- Otras naciones árticas
- Naciones no árticas

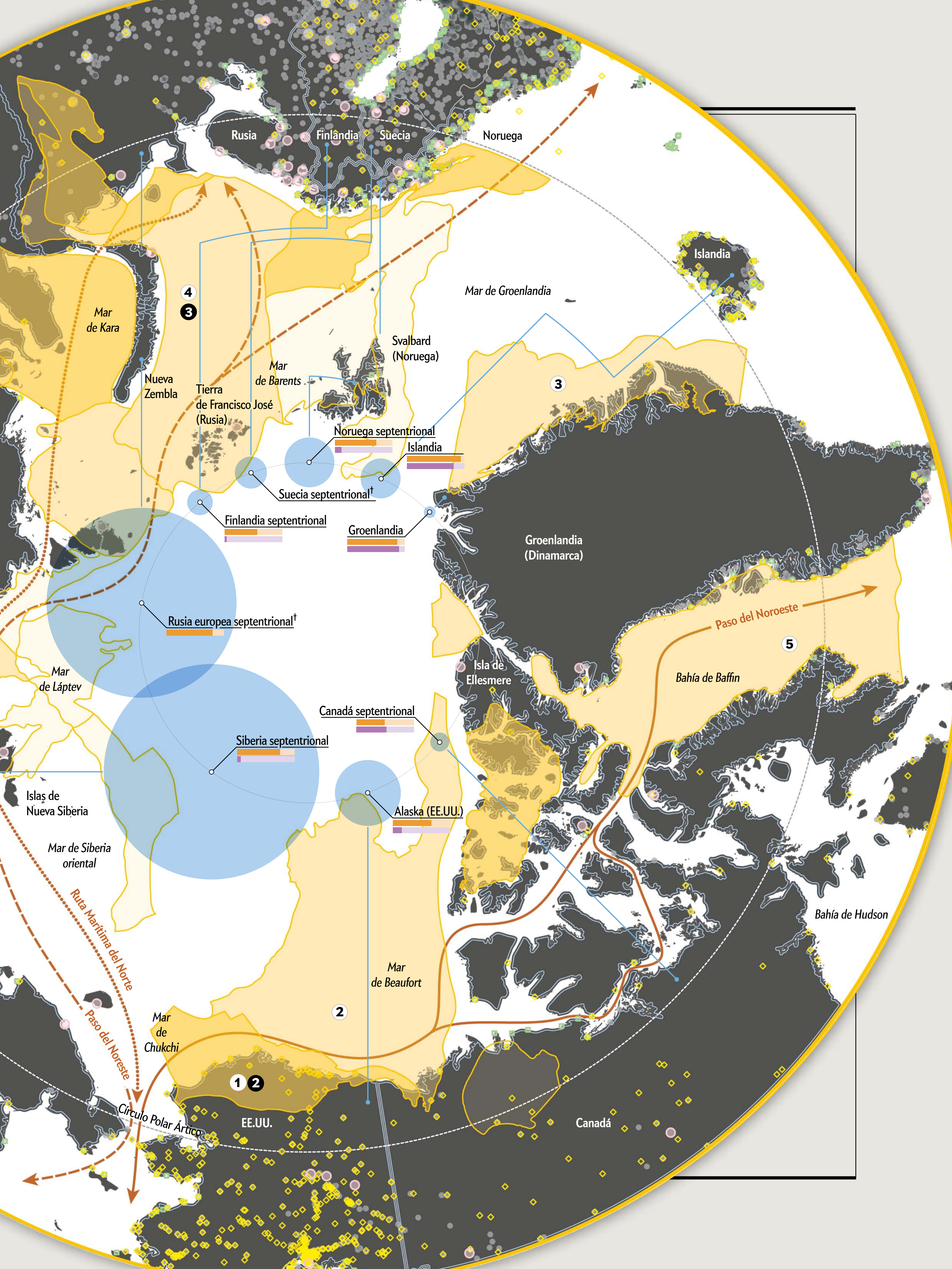




* Lo usual es que las magnitudes sean proporcionales al área del círculo. Esta infografía usa círculos en los que radio = (población)$^{2/3}$ para facilitar la comparación visual.

† Datos sobre población indígena o urbana no disponibles.

FUENTES: SERVICIO DE INSPECCIÓN GEOLÓGICA DE EE.UU. (*datos de petróleo y gas*); GREG FISKE/CENTRO DE INVESTIGACIÓN WOODS HOLE, CON DATOS OBTENIDOS EN DESPACEQUEST.COM (*datos de tráfico marítimo*); *THE INDIGENOUS WORLD* 2019, DIRIGIDO POR DAVID N. BERGER ET AL., GRUPO DE TRABAJO INTERNACIONAL SOBRE ASUNTOS INDÍGENAS, 2019 (*población sami e inuit*); ESTADÍSTICAS DE FINLANDIA; ESTADÍSTICAS DE SUECIA; ESTADÍSTICAS DE NORUEGA; ESTADÍSTICAS DE ISLANDIA; ESTADÍSTICAS DE GROENLANDIA; ESTADÍSTICAS DE CANADÁ; OFICINA DEL CENSO DE EE.UU.; SERVICIO FEDERAL DE ESTADÍSTICAS DEL ESTADO DE RUSIA; PORTAL ÁRTICO (*pasos del Noroeste y del Noreste*); INSTITUTO INTERNACIONAL DE ESTUDIOS ESTRATÉGICOS (*instalaciones militares*); FUNDACIÓN DEL PATRIMONIO (*instalaciones militares*); GEONAMES GAZETTEER (*lugares poblados, aeropuertos*); ÍNDICE MUNDIAL DE PUERTOS (*puertos*)



Rusia
Finlandia
Suecia
Noruega
Islandia
Mar de Groenlandia
Mar de Kara
Nueva Zembla
Tierra de Francisco José (Rusia)
Mar de Barents
Svalbard (Noruega)
Noruega septentrional
Islandia
Suecia septentrional†
Finlandia septentrional
Groenlandia
Groenlandia (Dinamarca)
Rusia europea septentrional†
Mar de Láptev
Paso del Noroeste
Bahía de Baffin
Isla de Ellesmere
Canadá septentrional
Siberia septentrional
Alaska (EE.UU.)
Islas de Nueva Siberia
Mar de Siberia oriental
Ruta Marítima del Norte
Paso del Noreste
Mar de Chukchi
Mar de Beaufort
Bahía de Hudson
Círculo Polar Ártico
EE.UU.
Canadá

por David Verdiell Cubedo, Javier Murcia Requena y Paz Parrondo Celdrán

La fauna protegida del Segura

Las reservas fluviales de la cuenca hidrográfica albergan varias especies de interés ecológico

Las reservas naturales fluviales (RNF) de España constituyen una figura de protección para los cauces en los que el impacto humano ha sido escaso y que todavía presentan un buen estado ecológico. La finalidad de esta figura es crear una red de reservas a escala nacional que ponga en valor y conserve el rico patrimonio fluvial todavía existente en nuestro país. Entre 2015 y 2018 se han creado 135 RNF correspondientes a diez cuencas hidrográficas.

En la cuenca del río Segura se han declarado ocho reservas, la mayoría de las cuales se sitúan en la zona de cabecera, en las provincias de Jaén y Albacete, y engloban los tramos mejor conservados de los ríos Segura, Tus y Zumeta, así como algunos arroyos tributarios de estos. En la Región de Murcia se localiza la reserva del río Chícamo, que pertenece a la tipología de ríos mediterráneos muy mineralizados, debido a que sus aguas recorren sustratos ricos en sales.

Desde octubre de 2018 nuestro equipo de trabajo de la Asociación Columbares está desarrollando el proyecto Versión Original del Segura, financiado en parte por la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica, con el objetivo principal de realizar actividades de divulgación sobre los valores naturales de las RNF declaradas en la cuenca.

Entre la fauna acuática de la cuenca, destacan varias especies piscícolas, como el fartet (*Aphanius iberus*), en peligro de extinción, el cacho (*Squalius pyrenaicus*) y el barbo del sur (*Luciobarbus sclateri*). Los anfibios son otro de los grupos con mayor interés de conservación, entre ellos la salamandra (*Salamandra salamandra*) y el sapo partero bético (*Alytes dickhilleni*), este último considerado un endemismo del sureste ibérico y catalogado como vulnerable.

Los odonatos son uno de los grupos de invertebrados acuáticos más notables en la cuenca, representados por los zigópteros, conocidos vulgarmente como caballitos del diablo, y los anisópteros o libélulas, y de los que se han llegado a contabilizar cerca de cuarenta especies. Además, algunas de las reservas mantienen poblaciones del cada vez más escaso cangrejo de río europeo (*Austropotamobius pallipes*), especie amenazada.

Por último, cabe mencionar la presencia de la nutria (*Lutra lutra*), mamífero íntimamente ligado al agua que en los últimos años está experimentando una expansión en numerosas cuencas fluviales peninsulares.

—David Verdiell Cubedo y Paz Parrondo Celdrán
Biólogos de la Asociación Columbares, Murcia.
—Javier Murcia Requena
Redactor de aQua y fotógrafo submarino.

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**





ANIMALES NOTABLES DE LA RESERVA: El pececillo fartet (*Aphanius iberus*) presenta uno de sus últimos reductos de aguas interiores en el río Chícamo ❶. Las larvas de salamandra (*Salamandra salamandra*) poseen branquias externas a modo de plumeros ❷. El sapo partero bético (*Alytes dickhilleni*) es un endemismo vulnerable; en la imagen, una larva posada sobre la vegetación subacuática ❸. El cangrejo de río europeo (*Austropotamobius pallipes*) mantiene todavía poblaciones abundantes en la parte alta de la cuenca ❹. Las libélulas (*Zygoptera*) son voraces depredadoras; en la imagen, una larva ❺.

FOTOGRAFÍAS DE JAVIER MURCIA REQUENA


1
2
3
4
5

por Agustí Nieto-Galan y Joaquim Sales

Agustí Nieto-Galan, catedrático de historia de la ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona, es investigador ICREA-Academia. **Joaquim Sales** es catedrático jubilado de química inorgánica de la Universidad de Barcelona.



Los pesos atómicos y la tabla periódica

La mirada de Enrique Moles, científico cosmopolita y modernizador de la enseñanza de la química

Las Naciones Unidas han declarado el 2019 como el Año Internacional de la Tabla Periódica. Se conmemoran los 150 años desde que el químico ruso Dimitri Mendeléiev (1834-1907) publicó su primera propuesta de ordenación periódica en 1869. A pesar de la indiscutible genialidad de Mendeléiev, hoy sabemos que la idea de la ordenación periódica del siglo xix, y la correspondiente tabla periódica del siglo xx, fueron el resultado de una larga empresa colectiva (los nombres de Döbereiner, Newlands, Olding y Lothar Meyer, entre otros, son imprescindibles), que además estaba íntimamente relacionada con la enseñanza de la química en escuelas y universidades.

En la segunda mitad del siglo xix, los químicos estaban preocupados por encontrar la mejor manera de organizar la información para sus estudiantes, y el descubrimiento creciente de nuevos elementos o sustancias simples representaba todo un reto educativo. Fue precisamente en el Congreso Internacional de Química que tuvo lugar en Karlsruhe en 1860, al que asistió Mendeléiev, donde se llegó a un consenso notable sobre el valor del peso atómico de cada elemento. Se trataba de una especie de número «mágico», que representaba el peso de un átomo a nivel microscópico y que reforzaba la matematización de la química, proceso que había iniciado el químico inglés John Dalton a principios del siglo xix con su hipótesis atómica y sus primeros cálculos del peso atómico [*véase* «Wurtz y la hipótesis atómica», por Natalie Pigeard-Micault; Investigación y Ciencia, marzo de 2014].

A pesar de las dificultades experimentales del cálculo preciso de los pesos atómicos, el consenso adquirido en Karlsruhe estimuló la creatividad de Mendeléiev y su intuición de que una ordenación de los elementos conocidos en función de su peso atómico creciente podría dar lugar a propiedades recurrentes y que permitiría agrupar los elementos en familias análogas. De Mendeléiev hacia adelante, el peso atómico se convirtió, por tanto, en un dato clave para la correcta ordenación y ubicación de los elementos (incluso para la predicción de algunos todavía no aislados en el laboratorio), pero también para la fiabilidad de los cálculos estequiométricos de los que dependía el análisis cuantitativo de numerosas sustancias en mercados y aduanas. De este modo, la sofisticación experimental de la determinación de pesos atómicos —un gran reto para los laboratorios de la segunda mitad del siglo xix— se combinaba con su utilidad práctica y su potencial didáctico.

Hablar de la ordenación periódica es hablar de Mendeléiev, pero también de tantos otros químicos que a lo largo del siglo xix y hasta bien entrado el siglo xx moldearon ese artefacto epistemológico y didáctico para extenderlo progresivamente hasta los últimos rincones del planeta. En esa epopeya colectiva, pocos incluirían seguramente el nombre del químico Enrique Moles (1883-1953), su contribución a la estandarización de los pesos atómicos, a la modernización de la enseñanza de la química en las primeras décadas del siglo xx y su impresionante proyección internacional.

Fruto de las políticas de promoción e internacionalización de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, conocida como la JAE, Moles se formó en las primeras décadas del siglo xx como pensionado en prestigiosos laboratorios en Leipzig y Ginebra dedicados a la química física, una disciplina que incorporaba aspectos de la física experimental para la explicación del cambio químico, y que permitía desarrollar nuevos experimentos de gran precisión. En Ginebra, Philipe A. Guye, antiguo discípulo de Wilhelm Ostwald (padre fundador de la química física), introdujo a Moles en la determinación experimental de pesos atómicos hasta la presentación de su tesis doctoral en 1916 sobre el peso atómico del bromo. Moles aprendió en el extranjero diversas técnicas que habían de contribuir a mejorar el cálculo del peso atómico de algunos elementos. El método de las densidades límite, perfeccionado por Moles y sus colaboradores, se basaba en la determinación de la densidad de un gas objeto de estudio y de la del oxígeno, que se tomaba como referencia. Moles determinó y perfeccionó el cálculo del peso atómico del bromo, flúor, nitrógeno, carbono, azufre, yodo y silicio.

Los pesos atómicos tenían además una importante proyección internacional, sobre todo después de la creación de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), en la que el propio Moles desempeñó un papel muy relevante y contribuyó a la proyección exterior de la ciencia española. La primera conferencia de la IUPAC se celebró en Roma en junio de 1920. Su comisión de pesos atómicos decidió que estos se revisarían cada diez años y que se volvería a la referencia histórica, propuesta por Dalton, H=1. Moles participó de manera activa en diversas conferencias de la IUPAC. En la reunión celebrada en Bucarest en 1925, fue nombrado miembro del Comité Internacional de Pesos Atómicos. Además, la Real Sociedad Española de Física y Química creó una comisión nacional de pesos atómicos, y la revista *Anales* reflejó

en buena medida las contribuciones del grupo de Moles en este campo.

La enseñanza de la química

Siguiendo en parte la estela didáctica de Mendeléiev, Moles combinó su ambición científica y la investigación básica sobre los pesos atómicos con su vocación docente y reformadora de la química como disciplina en la universidad española. Desde su cátedra de química inorgánica en la Universidad de Madrid, obtenida en 1927, Moles lanzó un conjunto de propuestas de modernización científica presentadas bajo la retórica cosmopolita de sus pesos atómicos consensuados con la comunidad científica internacional.

A un nivel más general, con una repercusión más amplia en toda la universidad española, estableció la tesina de licenciatura como prueba final, que venía a sustituir la tradicional reválida de final de carrera. Durante la República, fue miembro de distintas comisiones ministeriales que modificaron los planes de estudio, siendo uno de los responsables de que la licenciatura en química pasara de los cuatro cursos tradicionales a cinco, duración que se extendió posteriormente a la práctica totalidad de las licenciaturas y que perduró hasta bien entrados los años noventa del siglo pasado.

En las asignaturas de química inorgánica, la gran novedad consistió en estructurar la materia en base a la tabla periódica. En aquella época, los libros de texto presentaban el sistema periódico de los elementos en el último capítulo, renunciando así a las ventajas científicas y pedagógicas que pueden deducirse en tal sistema. Se explicaba, y exigía, la química inorgánica como un conjunto completamente deslavazado de métodos preparativos y propiedades de elementos y compuestos, con escasas relaciones entre los diferentes capítulos, exigiendo a los alumnos un esfuerzo memorístico pesado y poco estimulante.

Moles introdujo para los cursos de química inorgánica unos programas basados estrictamente en el sistema periódico, que es la forma más clara y útil desde el punto de vista didáctico. Ello fue una revolución científico-pedagógica que dio un enérgico impulso a la química en general y a la inorgánica en particular. El estudio detallado de la tabla periódica figuraba en las primeras lecciones, pero sus aplicaciones estaban presentes en todas las partes de la asignatura, relacionando propiedades físicas y químicas de los elementos y compuestos de manera fácil de entender.



ENRIQUE MOLES con varios colaboradores en el Laboratorio de Investigaciones Físicas, ca. 1925.

La modernidad de Moles en la IUPAC y en sus reformas educativas, sus cálculos precisos de pesos atómicos y su prestigioso grupo de investigación llegaron a la cumbre de la fama en los años 1930. Su sección de química física en el Instituto Nacional de Física y Química (INFQ, conocido como «Rockefeller» por la financiación que obtuvo de esa fundación norteamericana) constituyó un grupo numeroso y muy dinámico, una verdadera escuela de investigación en la que se formó una generación de químicos —y químicas— destacados [*véase* «Las jóvenes científicas del "Rockefeller" (1931-1939)», por Carmen Magallón; Investigación y Ciencia, junio de 2018]. A pesar de dedicarse prioritariamente a la investigación básica, esos científicos habían de desarrollar múltiples proyectos en colaboración con la industria.

No obstante, ese sería el principio del fin. El nuevo átomo físico de las primeras décadas del siglo xx, que había de acabar con la visión de Dalton, no tardaría en introducir nuevas partículas nucleares, que pronto convertirían el protón y el concepto de «número atómico» en un criterio más fiable que el peso atómico para la ordenación periódica de los elementos. Los refinados experimentos de Moles y su grupo para la medida de las densidades límite empezaban a parecer un poco superados.

Además, Moles fue víctima de la Guerra Civil y de la represión posterior de la dictadura de Franco. Acusado de colaborar con la Segunda República, fue desposeído de su cátedra, sometido a varios consejos de guerra y encarcelado, para obtener finalmente su libertad, marginado del sistema académico hasta su muerte en 1953. Triste final para una figura de la ciencia española que fue capaz de navegar con éxito en la ola de los pesos atómicos, la ordenación periódica y la modernización de la enseñanza de la química, que con tanto talento habían impulsado Mendeléiev y la comunidad científica internacional unas décadas antes. Sin duda, Enrique Moles merece un espacio de reconocimiento en este Año Internacional de la Tabla periódica. IyC

PARA SABER MÁS

La destrucción de la ciencia en España: Depuración universitaria en el franquismo. VV.AA. Dirigido por Luis Enrique Otero Carvajal. Editorial Complutense, Madrid, 2006.

Enric Moles Ormella. Determinació de pesos moleculars de gasos pel mètode de les densitats límits. Clàssics de la Química, núm. 7. Dirigido por Joaquim Sales y Agustí Nieto-Galan. Societat Catalana de Química, Barcelona, 2013.

The politics of chemistry. Science and power in twentiteth-century Spain. Agustí Nieto-Galan. Cambridge University Press, Cambridge, 2019.

Exilio y represión de la ciencia en el primer franquismo: el caso de Enrique Moles. Joaquim Sales y Agustí Nieto-Galan en *Ayer*, n.º 114, págs. 277-309, febrero de 2019.

por Yochai Benkler

Yochai Benkler es profesor de derecho y codirector del Centro Berkman Klein para Internet y Sociedad de la Universidad Harvard en Cambridge, Massachusetts.



La IA, en manos privadas

Las empresas tecnológicas orientan la investigación y la legislación de la inteligencia artificial en su propio beneficio

El sector privado se ha movilizado para diseñar la ciencia, la ética y las leyes de la inteligencia artificial (IA). En mayo se cumplía el plazo de presentación de propuestas a la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. (NSF), para un nuevo programa de financiación de proyectos sobre imparcialidad en IA, en colaboración con Amazon. En abril, después de que la Comisión Europea publicara las Directrices éticas para el uso fiable de la IA, un miembro del grupo de expertos que las redactó las describió como un «lavado ético» controlado por el sector privado. En marzo, Google creó una comisión de ética en IA que se disolvió tras una semana marcada por la polémica. En enero, Facebook invirtió 6,7 millones de euros en un centro sobre ética e IA en la Universidad Técnica de Múnich.

Es fundamental la participación de las empresas en el diseño del futuro de la IA, pero no pueden utilizar su poder para diseñar la investigación sobre el impacto que sus sistemas producen en la sociedad. Los Gobiernos y las entidades públicas deben apoyar la investigación independiente, e insistir en que el sector privado proporcione los datos suficientes para que se pueda auditar su actividad.

Los sistemas algorítmicos de toma de decisiones afectan a todos los aspectos de nuestra vida: los seguros de salud y el tratamiento médico; las hipotecas y los transportes; el control policial y la libertad condicional y bajo fianza; las noticias más destacadas y la propaganda política y comercial. Como los algoritmos se alimentan de datos que reflejan las desigualdades sociales, tienden a perpetuar injusticias sistémicas si no se diseñan medidas para contrarrestarlos. Por ejemplo, cabe la posibilidad de que los sistemas que predicen la reincidencia delictiva hayan incorporado datos de control policial diferentes para poblaciones blancas y negras, o que quienes califican las posibilidades de los candidatos para acceder a un puesto de trabajo se alimenten de un historial sesgado de ascensos.

En la caja negra de los algoritmos, los prejuicios sociales se vuelven invisibles e impunes. Cuando se diseñan con el único fin de obtener beneficios, necesariamente dejan de servir al interés público. Los beneficios de Facebook y YouTube dependen de que los usuarios permanezcan en sus sitios web y de ofrecer a los anunciantes la tecnología para distribuir mensajes altamente personalizados, lo que puede resultar ilegal o peligroso.

Cuando la NSF confiere a Amazon la legitimidad para desarrollar un programa de 5 millones de euros, menoscaba el papel de la investigación pública como contrapeso a la financiada por el sector privado. Una universidad renuncia a su función primordial cuando acepta el capital de una empresa para analizar las implicaciones éticas, políticas y legales de prácticas que son fundamentales para el modelo de negocio de dicha empresa. Lo mismo ocurre con los Gobiernos que delegan el desarrollo de marcos normativos en comités controlados por el sector privado. Es cierto que las instituciones han establecido algunos sistemas de protección. La NSF concederá subvenciones a la investigación a través del procedimiento normal de revisión por pares, sin la participación de Amazon, pero la empresa mantiene los medios contractuales, técnicos y organizativos para promocionar los proyectos que mejor convengan a sus objetivos. La Universidad Técnica de Múnich declara que Facebook no ha impuesto condiciones ni obligaciones para su financiación y que no formará parte del consejo asesor del centro que financia. En mi opinión, el riesgo y la percepción de injerencia indebida siguen siendo demasiado altos dada la magnitud de una donación que proviene de una única fuente y dado que atañe directamente a los intereses del donante.



Los Gobiernos deberían desarrollar leyes para exigir a las empresas que compartan información en bases de datos protegidas y permitan el acceso a investigadores independientes y financiados con dinero público. La participación de la empresa privada en las comisiones sobre normativas debería restringirse de manera estricta.

El sector privado cuenta con los datos y la preparación suficientes como para dotar de imparcialidad a los sistemas de IA. No se le puede excluir del diseño de procedimientos que nos permitan investigar cuáles son los problemas reales y las medidas de protección más efectivas, pero no se le debe permitir dirigirlos. Las organizaciones que trabajan para asegurar que la IA sea justa y beneficiosa deben financiarse con dinero público, estar sujetas a revisión por pares y ser transparentes para la población civil. Y la sociedad debe exigir un aumento de la inversión pública en investigación independiente, en vez de esperar que los fondos de la empresa privada subsanen este vacío sin corromper el proceso.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 569, pág. 161, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

ASTRONOMÍA

EL MAYOR OJO

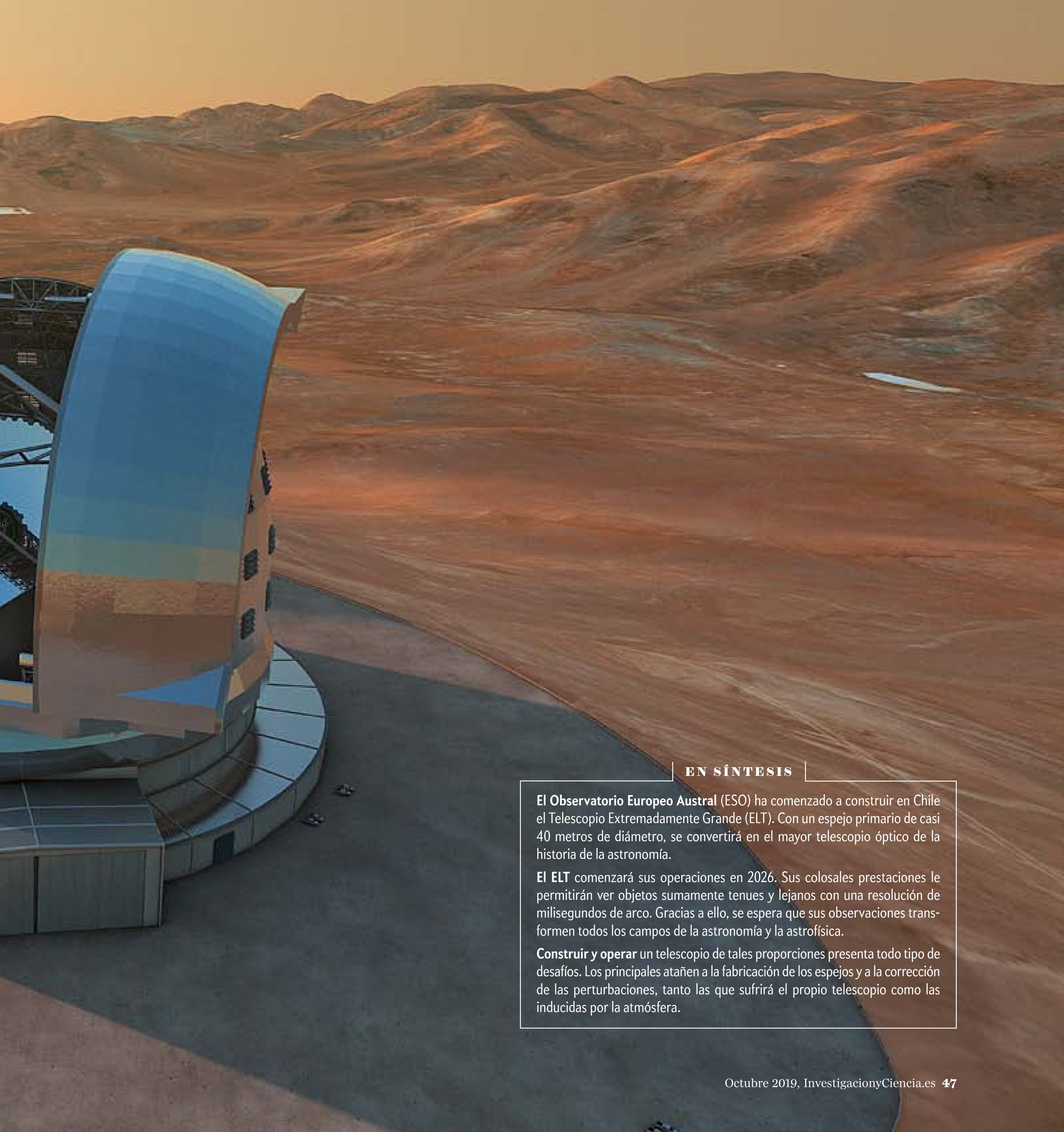
El Telescopio Extremadamente Grande observará el cosmos con un detalle sin precedentes, desde el sistema solar hasta las primeras estrellas del universo



CAE LA NOCHE: Recreación computarizada de un atardecer en el Telescopio Extremadamente Grande (ELT), en Chile.

DEL PLANETA

Xavier Barcons, Juan Carlos González Herrera y Agustín Sánchez Lavega



EN SÍNTESIS

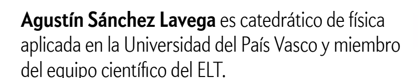
El Observatorio Europeo Austral (ESO) ha comenzado a construir en Chile el Telescopio Extremadamente Grande (ELT). Con un espejo primario de casi 40 metros de diámetro, se convertirá en el mayor telescopio óptico de la historia de la astronomía.

El ELT comenzará sus operaciones en 2026. Sus colosales prestaciones le permitirán ver objetos sumamente tenues y lejanos con una resolución de milisegundos de arco. Gracias a ello, se espera que sus observaciones transformen todos los campos de la astronomía y la astrofísica.

Construir y operar un telescopio de tales proporciones presenta todo tipo de desafíos. Los principales atañen a la fabricación de los espejos y a la corrección de las perturbaciones, tanto las que sufrirá el propio telescopio como las inducidas por la atmósfera.

Xavier Barcons es director general de la Organización Europea para la Investigación Astronómica del Hemisferio Austral (ESO).

Juan Carlos González Herrera es jefe de ingeniería de sistemas del programa para la construcción del Telescopio Extremadamente Grande (ELT).



Agustín Sánchez Lavega es catedrático de física aplicada en la Universidad del País Vasco y miembro del equipo científico del ELT.



En 1610, con un pequeño telescopio de pocos centímetros de diámetro, Galileo apuntó al cielo y contempló por primera vez las lunas de Júpiter. Aquel hito comenzó a revelar la verdadera estructura de nuestro entorno cósmico más cercano y supuso el nacimiento de la astronomía observacional: el estudio científico del universo por medio de instrumentos cada vez más potentes y precisos.

Desde entonces los éxitos no han dejado de sucederse. Tres siglos después de la hazaña de Galileo, la puesta en marcha del telescopio de 2,5 metros de diámetro del Observatorio de Monte Wilson permitió determinar la distancia a numerosas galaxias y constatar la expansión del universo. A finales de los años cincuenta del siglo pasado, el telescopio de 5 metros del Observatorio de Monte Palomar hizo posible descubrir la naturaleza de los cuásares, núcleos activos de galaxias que hoy los astrónomos utilizan para explorar los confines del universo observable. Y en 2004, el Telescopio Muy Grande (VLT) de 8,2 metros, en Chile, obtuvo la primera imagen directa de un planeta ubicado fuera del sistema solar.

Los ejemplos anteriores no constituyen más que una pequeña muestra de cómo la construcción de telescopios cada vez mayores nos ha llevado más y más lejos en nuestra comprensión del universo. Por esa razón, hace unos veinte años, la Organización Europea para la Investigación Astronómica en el Hemisferio Austral (ESO, más conocida como Observatorio Europeo Austral) inició los estudios para erigir el que dentro de poco se convertirá en el mayor telescopio óptico de la historia: el Telescopio Extremadamente Grande (ELT, por sus siglas en inglés).

Este gigantesco observatorio se levantará en Cerro Armazones, en el desierto chileno de Atacama, y se espera que vea su primera luz técnica en 2025. Además de poseer una instrumentación de vanguardia para efectuar todo tipo de análisis, la característica más notoria de este nuevo telescopio será su espejo primario, el cual medirá casi 40 metros de diámetro. Para hacernos una idea, eso quiere decir que ocupará un área similar a la de tres canchas de baloncesto. Tales dimensiones carecen por completo de precedentes en la historia de la astronomía y suponen un salto cualitativo con respecto a los mayores telescopios ópticos existentes hoy en día. Los dos telescopios del Observatorio Keck, en Hawái, y el Gran Telescopio Canarias, en La Palma (el mayor aparato de este tipo actualmente en funcionamiento), cuentan con espejos de unos 10 metros de diámetro y una superficie unas 14 veces menor que la que abarcará el espejo principal del ELT.

La construcción de un observatorio de semejantes proporciones plantea todo tipo de desafíos. Sin embargo, al igual que ha ocurrido otras veces en el pasado (como sucedió con la transición de los telescopios de 2 a 4 metros o, más tarde, de 4 a entre 8 y 10 metros), los avances en el campo han convertido dicho objetivo en un reto técnica y financieramente viable.

La razón científica para dar este salto se debe a que, en un telescopio reflector, como el ELT, el diámetro del espejo primario dicta dos características clave: la cantidad de luz que puede captar el aparato y su poder de resolución. La primera se traduce en la facultad para observar objetos muy tenues y distantes, mientras la segunda hace referencia a la capacidad para distinguir objetos muy próximos entre sí en la bóveda celeste. Las leyes de la óptica establecen que la captación de luz aumenta con el área del espejo, mientras que el poder de resolución lo hace de manera proporcional al radio. Como consecuencia, en el ELT estas cantidades serán, respectivamente, 14 y 4 veces mayores que en el Gran Telescopio Canarias.

El ELT observará en una amplia zona del espectro electromagnético que abarcará la luz visible y el infrarrojo cercano. Este tipo de astronomía, denominada «óptica» (por oposición a la astronomía de rayos X o la radioastronomía, por ejemplo), resulta especialmente adecuada para estudiar las estrellas y las galaxias. Gracias a todo ello, el ELT podrá caracterizar atmósferas de exoplanetas y buscar en ellas trazadores de actividad biológica; será capaz de resolver la estructura y la composición de galaxias lejanas; observará en detalle los efectos de los agujeros negros supermasivos que ocupan el centro de las galaxias, y podrá medir de forma directa la aceleración de la expansión del

PÁGINAS ANTERIORES: ESO/L. CALÇADA



EMPLAZAMIENTO IDEAL: El ELT se alzará en la cima de Cerro Armazones, en el desierto chileno de Atacama. A 3000 metros de altitud, la ubicación destaca por la extraordinaria calidad del cielo. Esta imagen aérea muestra el estado reciente de las excavaciones.

ESO

universo, entre otros muchos fines. Los objetivos científicos del ELT serán múltiples y llevarán a una auténtica transformación de todos los campos de la astronomía y de la astrofísica, desde lo más cercano a lo más lejano.

EUROPA Y LOS GRANDES TELESCOPIOS

En una época en que ni siquiera existe una carrera espacial entre grandes potencias, no es una sorpresa que en la construcción de los mayores observatorios astronómicos rija la cooperación internacional. En este sentido, Europa tomó la iniciativa hace más de 56 años con la creación de la ESO, organismo del que hoy forman parte 16 países. Lo que hace más de medio siglo fue un movimiento para la supervivencia de la astronomía europea ha terminado poniendo esta a la cabeza de la astronomía mundial desde tierra. No en vano, el complejo de astronomía óptica más potente del mundo es hoy el VLT, un conjunto de cuatro telescopios de 8,2 metros situados en el observatorio que la ESO tiene en Cerro Paranal, en Atacama.

En cuanto a la astronomía en longitudes de onda mayores, la cooperación internacional batió marcas con la construcción del Gran Conjunto Milimétrico/submilimétrico de Atacama (ALMA), un radiotelescopio con 66 antenas fruto de la colaboración entre Europa (ESO), América (EE.UU. y Canadá) y Asia (Japón, Taiwán y Corea del Sur). Inaugurada en 2013, se trata de una instalación única para el estudio del universo frío (gas, polvo interestelar, discos protoplanetarios, etcétera) que, como tal, se halla sujeta a una intensa competición por el tiempo de observación.

Sin embargo, la estrategia de éxito de ALMA no se ha repetido en el camino hacia la siguiente generación de telescopios ópticos. En la actualidad existen tres proyectos para construir telescopios gigantes, con espejos de más de 20 metros de diámetro. Dos de ellos, el Telescopio Gigante Magallanes (24 metros) y el Telescopio de Treinta Metros (30), están liderados por instituciones estadounidenses. Por su parte, Europa apostó hace unos años por el ELT.

Tras un largo período de estudios y diseños conceptuales, la ESO se decidió por un diseño que contempla un espejo primario de 39,3 metros. En 2010 se acordó ubicarlo en Cerro Armazones. Situado a algo más de 3000 metros de altitud, este lugar se enmarca dentro de una extensión del territorio del Observatorio de Paranal que el Gobierno de Chile otorgó a la ESO para este propósito. Junto a la excelente calidad del cielo, el hecho de que Armazones y Paranal disten tan solo 20 kilómetros permitirá operar el ELT como parte del Observatorio de Paranal.

El coste total directo del telescopio se calcula en unos 1200 millones de euros, cantidad financiada por los Estados miembros de la ESO. A diferencia de los proyectos liderados por EE.UU., la ESO decidió no comenzar la ejecución del ELT hasta que no tuviera asegurado el 90 por ciento de la financiación, un hito que se alcanzó a finales de 2014. Ya en 2015 se terminó la carretera de acceso a Cerro Armazones y el aplanado de la cima para comenzar la obra civil. Tras el fin de las excavaciones, las cuales concluyeron el año pasado, los próximos pasos serán las cimentaciones y la instalación de los sistemas de amortiguamiento antisísmico. A ello seguirá la construcción del edificio auxiliar y de la cúpula, en cuyo interior se erigirá después la estructura del telescopio.

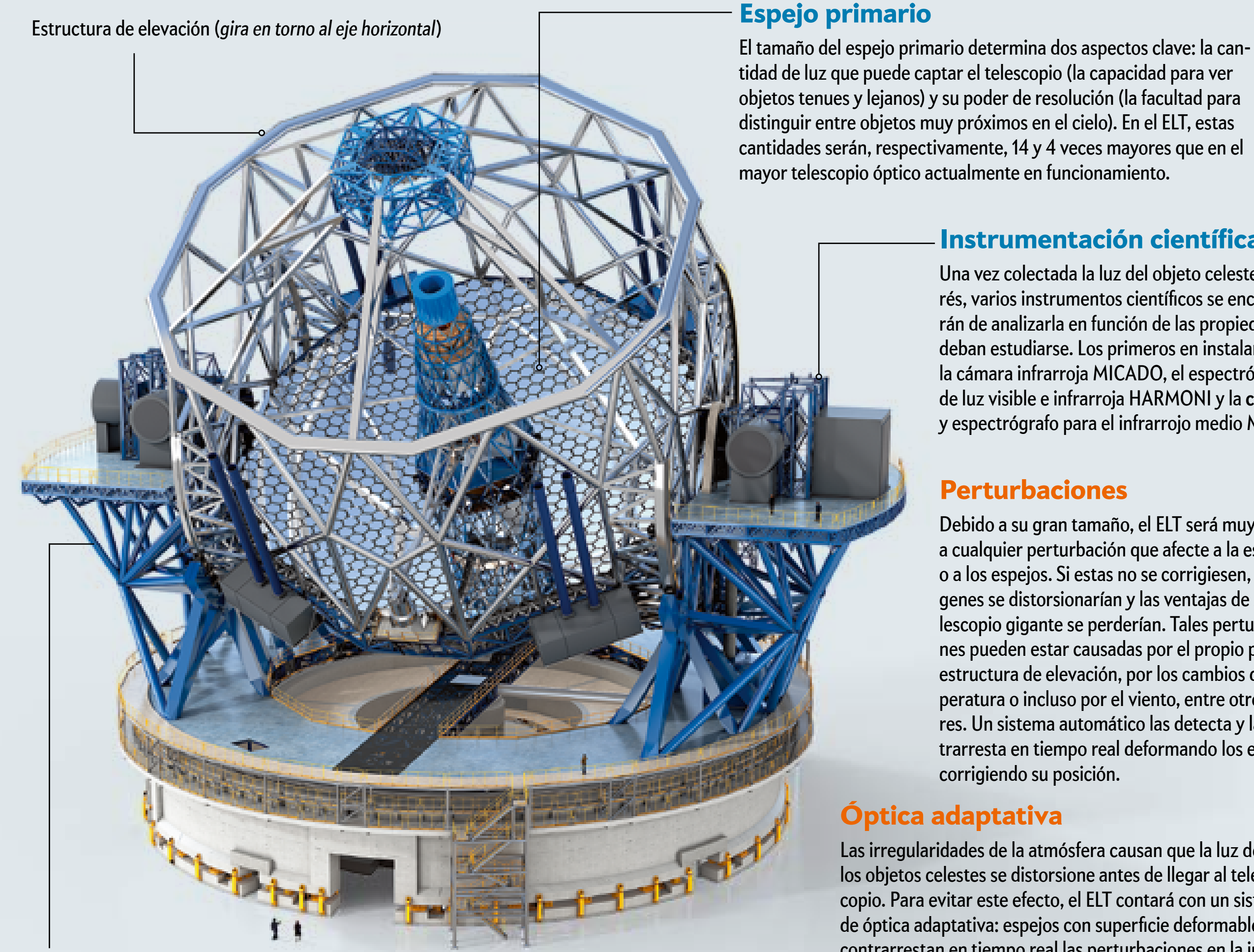
El verdadero corazón del ELT, el conjunto de sistemas ópticos y mecánicos, constituye un reto de enorme magnitud. En estos momentos la industria europea ya está trabajando en la producción de todos los elementos, incluidos espejos, soportes, actuadores, sensores y otros muchos. La primera luz técnica se prevé en 2025; tras ella, se instalarán los primeros instrumentos para comenzar en 2026 con las operaciones científicas.

ESPEJOS GIGANTES

El ELT se compondrá esencialmente del telescopio, la instrumentación científica y la infraestructura de soporte para ambos. La función del telescopio es colectar la luz visible e infrarroja del objeto celeste de interés y, mediante una sucesión de seis espejos (el primario y otros cinco), formar una imagen en el

Un telescopio de 40 metros

La característica principal del ELT será su descomunal espejo primario, de 39,3 metros de diámetro. El observatorio dispondrá además de múltiples instrumentos científicos que le permitirán analizar de distintas maneras la luz de los objetos celestes. Debido a sus colosales dimensiones, su principal problema será contrarrestar las perturbaciones, tanto las que afecten al propio telescopio como aquellas generadas por la atmósfera. Este esquema muestra la estructura interna —sin cúpula protectora— del observatorio.



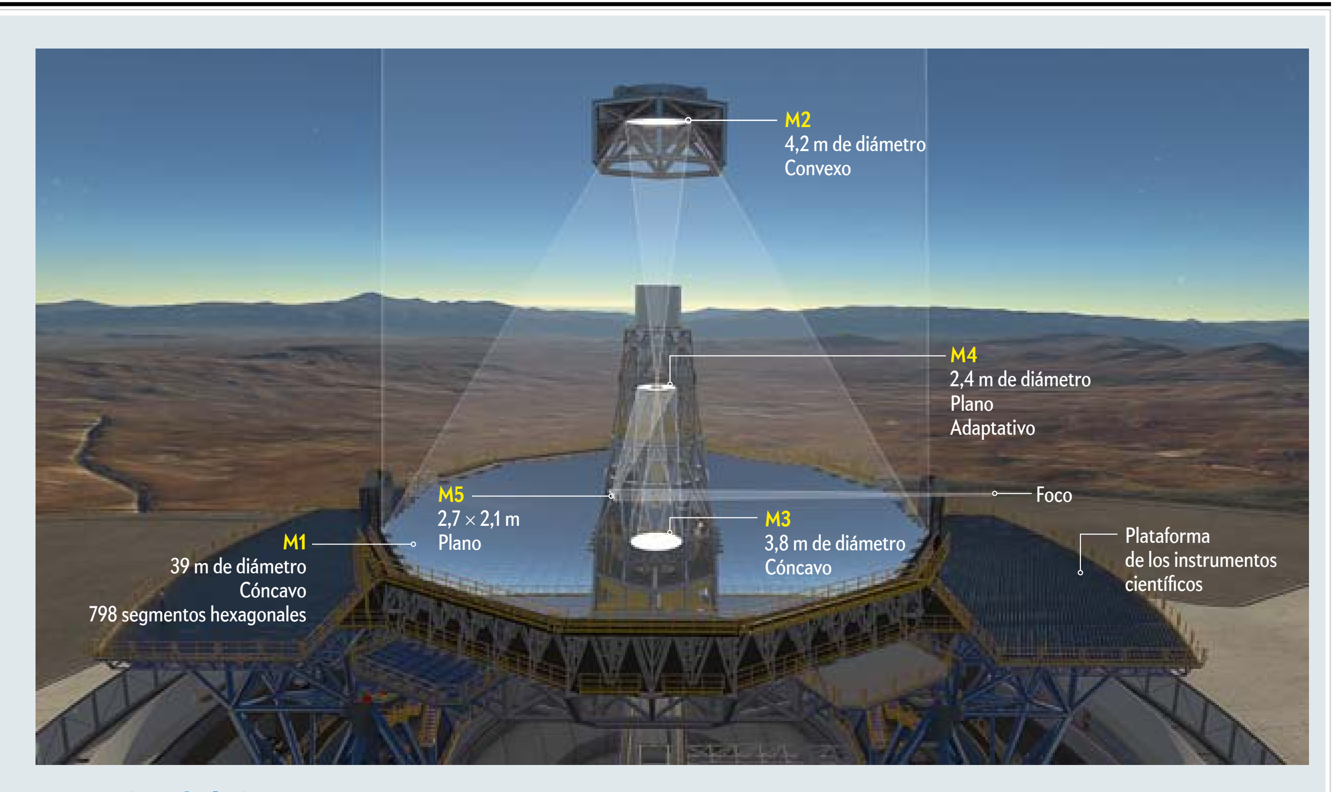
ESO/DORLING KINDERSLEY

foco. En realidad, en lugar de en un punto focal, la imagen se formará en una superficie focal con un diámetro aproximado de dos metros, correspondiente a 10 minutos de arco en el cielo (una tercera parte de la anchura de la luna llena).

Los instrumentos científicos son los encargados de procesar la imagen generada por el telescopio de acuerdo a las aplicaciones que se precisen (formación de imágenes, espectroscopía, coronografía, etcétera). Al objeto de maximizar la eficiencia del observatorio, el telescopio cuenta con ocho estaciones focales, lo que permite instalar hasta ocho instrumentos distintos, si bien solo uno puede estar activo en cada momento. Mientras que el telescopio y la infraestructura de soporte son elementos que permanecen a lo largo de la vida útil del observatorio (por lo general varias décadas), los instrumentos tienen una vida más corta, del orden de unos diez años. Es esta evolución de la instrumentación lo que permite que los observatorios astronómicos se sitúen permanentemente en la frontera de la ciencia.

Merced a su gigantesco espejo primario, el ELT será capaz de discernir objetos separados en el cielo tan solo 5 milisegundos de arco. Esto supone un poder de resolución 12.000 veces mayor que el del ojo humano, 16 veces mayor que el del telescopio espacial Hubble y 4 veces mayor que el del Gran Telescopio Canarias. En cuanto a la capacidad colectora de luz, el ELT contará con 978 metros cuadrados, frente a los 655 del Telescopio de Treinta Metros, los 368 del Telescopio Gigante Magallanes, los 74 del Gran Telescopio Canarias o los 4,5 del Hubble.

A medida que el tamaño del espejo principal aumenta, la complejidad tecnológica y el coste se disparan. Los mayores telescopios existentes hoy en día se dividen entre los que tienen el espejo primario de una sola pieza, como los cuatro que com-

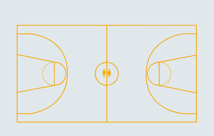


Formación de la imagen

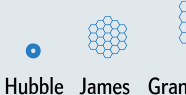
El ELT cuenta con una sucesión de seis espejos que guían los rayos de luz (*zonas sombreadas*) hasta formar la imagen en el foco. Este esquema muestra los cinco primeros espejos (M1 a M5). El sexto (M6, *no mostrado*) se encuentra en la plataforma de los instrumentos científicos; su función es dirigir el haz óptico hacia uno de los instrumentos instalados en dicha plataforma. El telescopio cuenta con dos de tales plataformas, cada una con su propio M6.

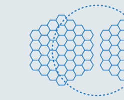
Una nueva generación de telescopios

El ELT será el mayor de una nueva generación de telescopios ópticos gigantes llamados a revolucionar todos los campos de la astronomía. Este esquema muestra a escala el tamaño del espejo primario de algunos de los principales telescopios ópticos existentes (*azul*) o proyectados (*gris*).

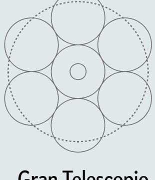




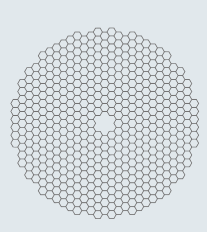


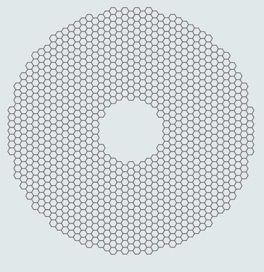












ESO

ponen el VLT en Cerro Paranal, y aquellos que poseen un espejo primario segmentado; es decir, dividido en piezas menores. Este es el caso de los telescopios del Observatorio Keck, el del Gran Telescopio Canarias y será también el del ELT.

La razón para construir espejos segmentados es simple: a partir de cierto tamaño es técnicamente imposible tallar y pulir un espejo monolítico. Así pues, la solución pasa por fabricar varias piezas y ensamblarlas. Sin embargo, para que un espejo segmentado pueda cumplir con los requisitos científicos, en particular en lo que se refiere a la calidad de la imagen, el verdadero reto consiste en mantener todos los segmentos de modo que se comporten como una pieza monolítica gigante.

En el caso del ELT, el espejo primario estará formado por 798 segmentos hexagonales de unos 1,4 metros entre vértices opuestos. Cada uno contará con doce sensores y tres actuadores para controlar su posición, así como con otros mecanismos. Todo ello hace del espejo primario el sistema más complejo del observatorio. La máxima discontinuidad vertical tolerable entre segmentos adyacentes es de pocas decenas de nanómetros y su superficie admite errores de fabricación de tan solo 20 nanómetros, lo que requiere un proceso extremadamente laborioso y costoso, de unos seis años de duración. Aparte del espejo primario, los demás espejos presentan requisitos de pulido similares y, aun siendo monolíticos, su fabricación debe superar numerosas dificultades.

COMPENSAR LAS PERTURBACIONES

Con todo, el principal desafío técnico del ELT consistirá en mantener los seis espejos en la forma y posición correctas frente a las perturbaciones, tanto las externas como las generadas in-

Continúa en la página 54

¿Qué estudiará el ELT?

El ELT podrá analizar con enorme detalle todo tipo de objetos celestes cercanos y lejanos. Gracias a una instrumentación de vanguardia, sus objetivos científicos serán múltiples y abarcarán desde el sistema solar, las atmósferas de exoplanetas y los discos protoplanetarios hasta las galaxias distantes, los agujeros negros y las primeras estrellas del cosmos.



Saturno fotografiado por la sonda *Cassini* en 2010.

Sistema solar

Cabría pensar que ante la avalancha de misiones espaciales que recorren el sistema solar y estudian sus astros *in situ*, poco puede añadir un telescopio desde tierra. Sin embargo, dada la abundancia y diversidad de los cuerpos del sistema solar, su variabilidad y la lejanía de algunos de ellos, son numerosos los aspectos que pueden explorarse.

El estudio de los cuerpos primitivos más pequeños, como asteroides, cometas y objetos del cinturón transneptuniano, permitirá indagar en el pasado de nuestro sistema planetario. En los satélites de algunos planetas se produce una rica variedad de procesos cambiantes que el ELT podrá seguir y caracterizar. Entre ellos destacan las nubes, lagos y mares de metano de Titán (la luna de Saturno), la actividad volcánica del Ío (satélite de Júpiter) o los géiseres y penachos acuosos de Europa (Júpiter) y Encélado (Saturno), de gran interés astrobiológico.

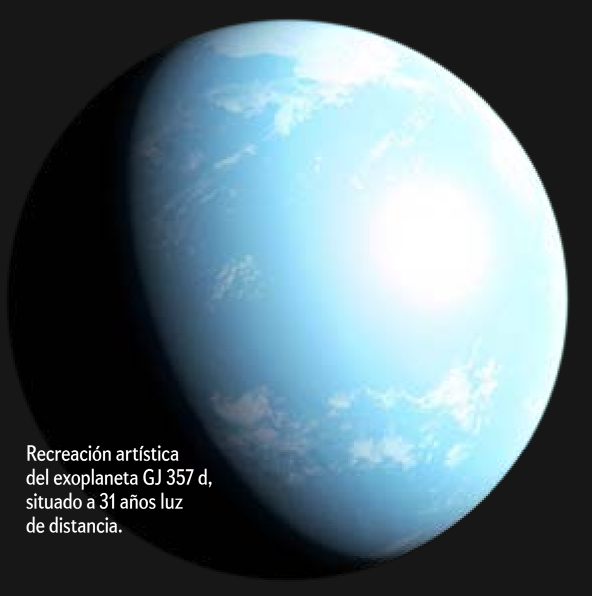
Por otra parte, dada la ausencia de misiones espaciales a Urano y Neptuno, a los que no se llegará hasta la década de 2030, el ELT podrá estudiar con detalle la meteorología, el clima, los vientos y las atmósferas de estos lejanos mundos. Hoy, el Hubble y los grandes telescopios ópticos terrestres pueden acometer solo en parte estas investigaciones y con una resolución mucho menor que la que logrará el ELT.

Exoplanetas

Son ya unos 4000 los planetas en torno a otras estrellas los que han sido catalogados desde que se descubriera el primero, en 1995. La variedad es enorme y conocemos algunos detalles de sus órbitas, así como sus masas y tamaños, lo que permite inferir si se trata de planetas rocosos, gaseosos o helados. Sin embargo, es muy poco lo que sabemos sobre sus propiedades físicas. Solo en el caso de algunos exoplanetas de gran tamaño se ha podido determinar la presencia de ciertos compuestos químicos o neblinas altas en sus atmósferas.

El ELT podrá estudiar con precisión las propiedades fisicoquímicas de numerosos exoplanetas. Con todo, su objetivo más ambicioso, y una de las razones fundamentales que han motivado su construcción, será caracterizar los planetas similares a la Tierra, en particular aquellos situados en la zona de habitabilidad de su estrella anfitriona, la región donde la temperatura permite la existencia de agua líquida en la superficie.

Mediante técnicas de coronografía (ocultación de la luz de la estrella para dejar al descubierto la del planeta) como las que proporcionará el instrumento METIS, el ELT podrá analizar las atmósferas de numerosos exoplanetas y determinar sus temperaturas a partir de la luz reflejada y de la radiación térmica que emiten. También se podrán rastrear huellas de vapor de agua, oxígeno y otros gases potencialmente biomarcadores, como el metano y el óxido nitroso, en planetas de menor tamaño. La búsqueda de «trazadores de vida» (ozono, metano, clorofila) será uno de los objetivos primordiales.



Recreación artística del exoplaneta GJ 357 d, situado a 31 años luz de distancia.

Recreación artística del disco protoplanetario de la estrella HD 21997, a 235 años luz de la Tierra.

Sistemas planetarios

La formación de sistemas planetarios será otra de las líneas de investigación del ELT. El observatorio ALMA, en Atacama, ya ha logrado observar con detalle la estructura de discos protoplanetarios alrededor de estrellas jóvenes. Gracias a una elevada resolución tanto espectral como espacial, el ELT podrá analizar la manera en que la materia se agrupa en estos discos para formar planetas, determinar sus movimientos y la distribución de gas y polvo. Ello contribuirá a entender cómo se forman los sistemas planetarios en los distintos tipos de estrellas.



La galaxia UGC 1810, situada a 300 millones de años luz, fotografiada por el telescopio espacial Hubble.

Galaxias y agujeros negros

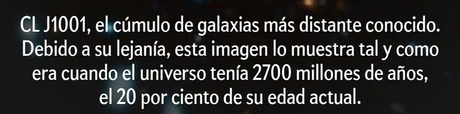
Otro de los objetivos fundamentales del ELT será desentrañar los mecanismos de formación y evolución galáctica. Su elevada resolución espacial le permitirá analizar con gran detalle el agujero negro central de la Vía Láctea y los de otras galaxias cercanas. Podrá medir cómo se mueven a su alrededor las estrellas del centro galáctico, cómo crecen estos colosos y cómo influyen en la evolución de las galaxias.

El ELT también estudiará las partes más externas de las galaxias. La espectroscopía en el infrarrojo cercano del instrumento METIS permitirá analizar miles de estrellas de cúmulos globulares, «enjambres» que rodean las galaxias a modo de satélites. También espera estudiar la evolución química y la estructura de las galaxias de los cúmulos de Virgo y Fornax, situados respectivamente a 54 y 62 millones de años luz.

Universo lejano

La espectroscopia de alta resolución del ELT le permitirá analizar la luz de supernovas muy lejanas, correspondientes a épocas en que el universo tenía entre 1000 y 6000 millones de años de edad (su edad actual se estima en unos 13.800 millones de años). Podrá estudiar las galaxias de aquella época, su evolución química y sus mecanismos de formación estelar.

Sin embargo, el ELT podrá también retrotraerse a épocas mucho más remotas. Su capacidad única para observar fuentes débiles y lejanas le permitirá observar la época en que el universo tenía entre 200 y 500 millones de años de edad, el momento en el que el cosmos se llenó con la luz de las primeras estrellas, el hidrógeno se ionizó y nacieron las primeras protogalaxias. Los mejores telescopios actuales solo son capaces de detectar con dificultades algunas de las galaxias más luminosas en el momento en que el cosmos tenía unos 500 millones de años.



CL J1001, el cúmulo de galaxias más distante conocido. Debido a su lejanía, esta imagen lo muestra tal y como era cuando el universo tenía 2700 millones de años, el 20 por ciento de su edad actual.

Expansión acelerada del universo

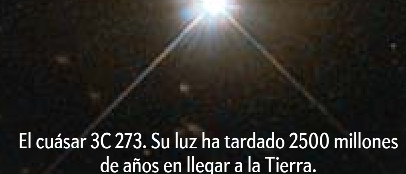
Desde hace unos 25 años sabemos que la expansión del universo se produce cada vez más deprisa. Este inesperado resultado se obtuvo observando un tipo concreto de supernovas, las cuales brillan con una luminosidad conocida y, por tanto, permiten calcular la distancia a la que se encuentran con independencia de la velocidad a la que se alejen. Dicho descubrimiento, basado en parte en observaciones realizadas con telescopios de la ESO, motivó en 2011 la concesión del premio Nobel de física a Saul Perlmutter, Adam Riess y Brian Schmidt.

Estudiar este fenómeno con detalle constituye uno de los principales objetivos de la cosmología moderna. El ELT podrá medir con gran precisión la velocidad de alejamiento de galaxias lejanas. Al comparar los datos correspondientes a distintas épocas, podrá obtener una medición directa de la aceleración de la expansión cósmica.

Algunas de las galaxias más lejanas y antiguas conocidas, fotografiadas por el telescopio espacial Hubble.

Física fundamental

Por último, el ELT también podrá obtener pistas sobre algunos aspectos abiertos en física fundamental. Uno de ellos es la pregunta de si la «constante de estructura fina» (la cantidad que dicta la intensidad de la interacción electromagnética entre partículas elementales) o la relación entre la masa del protón y la del electrón han sido siempre iguales desde el nacimiento del universo, o si por el contrario han ido variando a lo largo de la historia cósmica. Mediante el análisis de la luz de cuásares muy remotos, el ELT podrá medir cambios en la constante de estructura fina de una parte en diez millones y determinar si dependen de la distancia a la fuente; es decir, de la edad del universo.



El cuásar 3C 273. Su luz ha tardado 2500 millones de años en llegar a la Tierra.

Viene de la página 51
ternamente. Esto se aplica a cualquier telescopio, pero resulta particularmente complejo en el caso de los telescopios gigantes. Las perturbaciones de origen externo pueden estar inducidas por la gravedad, por el viento y por las variaciones de temperatura durante la noche. Por su parte, las perturbaciones internas pueden obedecer a las diferencias térmicas entre las distintas partes del telescopio y a las vibraciones de la estructura.

Para apreciar la sutileza y complejidad de estos efectos, es necesario entender primero cómo se mueve un telescopio. Al apuntar a un objeto en el cielo, el aparato procede de forma similar a un cañón: la llamada «estructura de azimut» gira alrededor de un eje vertical, mientras que la «estructura de elevación» lo hace en torno a un eje horizontal. Tales movimientos pueden ejecutarse con rapidez y suelen completarse en pocos minutos. Sin embargo, una vez apuntado el cuerpo celeste, es necesario compensar la rotación de la Tierra durante todo el tiempo que dure la observación (típicamente, entre unos minutos y una hora).

La estructura se ve sometida a deformaciones causadas por su propio peso y cuya magnitud depende de la posición del telescopio con respecto a la vertical. Ello afecta a la estructura de elevación, que, con una masa de 2000 toneladas, ve modificada significativamente su inclinación vertical a medida que el telescopio trabaja. Todas estas deformaciones estructurales causan el desplazamiento de los espejos con respecto a su posición nominal. A ello hay que añadir las deformaciones que sufren los espejos mismos como consecuencia de su propio peso. Si no se compensan, ambos efectos generan errores de apuntado y distorsiones en la imagen focal.

Por otro lado, las variaciones de temperatura a lo largo de la noche, así como las existentes entre las diferentes partes del telescopio, inducen contracciones y dilataciones en la estructura y en los espejos, que, al igual que en el caso de la gravedad, afectan al apuntado y a la calidad de la imagen. Lo mismo ocurre con las perturbaciones inducidas por el viento, muy habituales ya que los observatorios astronómicos suelen estar ubicados en lugares donde la calidad de la atmósfera es excelente, pero donde el viento sopla a menudo con fuerza. Por último, a todo lo anterior hay que sumar las vibraciones inducidas en la propia estructura de soporte: numerosos equipos, como los refrigeradores de agua o las bombas de aceite para los cojinetes hidrostáticos que soportan los dos ejes del telescopio, generan vibraciones de alta frecuencia que inducen movimientos pequeños pero muy rápidos en los espejos.

Por fortuna, salvo las vibraciones internas, todas las perturbaciones mencionadas pueden contrarrestarse hasta niveles aceptables. Para ello el telescopio cuenta con una serie de actuadores capaces de modificar tanto la forma como la posición de los espejos. Dichos actuadores se comandan de manera automática a partir de una serie de cámaras que constantemente producen imágenes de objetos celestes de referencia, lo que permite compararlas y compensar las deformaciones en tiempo real. Las vibraciones de la estructura, sin embargo, se suceden con tal rapidez que resultan muy difíciles de compensar. La estrategia es, por tanto, combatirlas en origen, impidiendo que se produzcan o mitigándolas mediante el uso de monturas antivibratorias y otros sistemas.

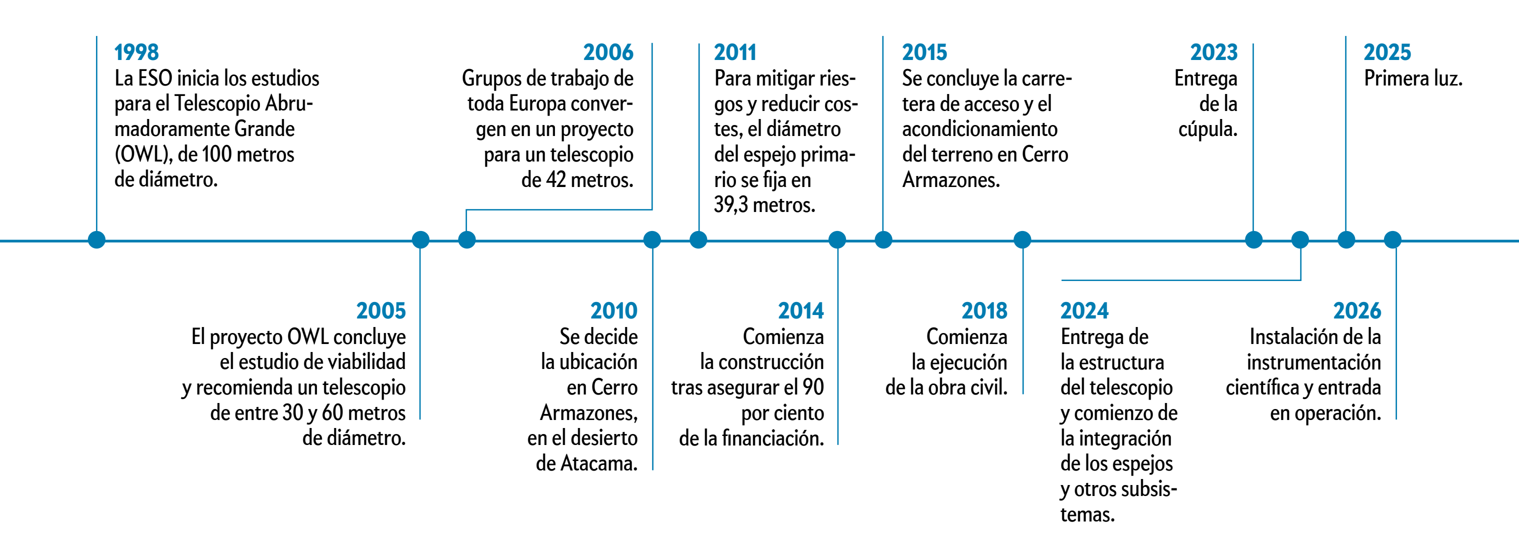
LÁSERES EN EL CIELO

Además de las perturbaciones descritas hasta ahora, la atmósfera terrestre introduce un nuevo efecto indeseado: debido a la distribución irregular de su temperatura y, por tanto, de su índice de refracción, los rayos de luz procedentes de los objetos celestes se distorsionan antes de llegar al telescopio. Evitar este fenómeno es el motivo principal por el que se lanzan telescopios al espacio, como el Hubble o el futuro James Webb de la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Canadiense.

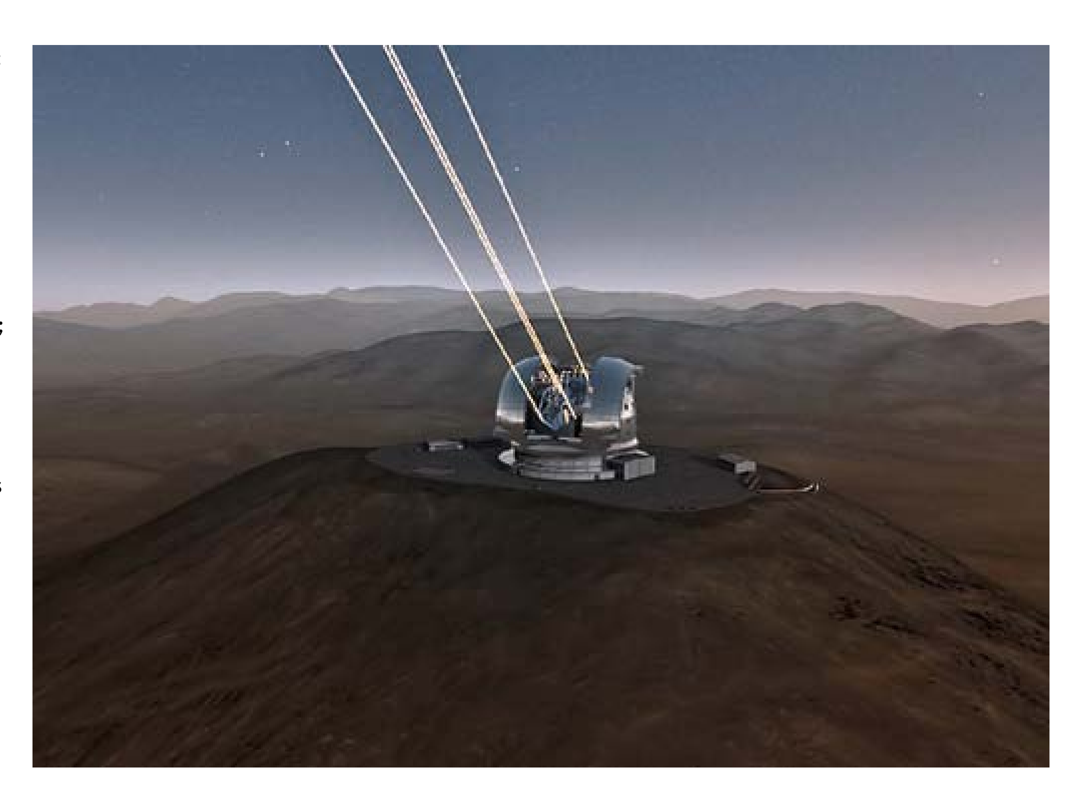
Una vez más, este efecto, que haría inútil el esfuerzo por construir un telescopio gigante en lo que se refiere a la resolución, se puede compensar. La solución consiste en emplear técnicas de «óptica adaptativa»: en esencia, usar espejos con superficie deformable para contrarrestar las distorsiones atmosféricas. A pesar de que la tecnología existe y está muy madura, aplicarla a un observatorio de 39,3 metros supone un nuevo reto. El ELT incorpora un espejo deformable, el cuarto, que cuenta con más de 5300 actuadores y mide 2,4 metros de diámetro con solo 2 milímetros de espesor. Este espejo es uno de los mayores retos del ELT, a la vez que un elemento crítico del mismo.

El origen de esta técnica se remonta a mediados del siglo XX, pero solo comenzó a aplicarse en astronomía en los años noventa gracias al avance de los métodos computacionales. Hoy se em-

CRONOLOGÍA DEL ELT



ESTRELLAS ARTIFICIALES: Los telescopios actuales cuentan con sistemas de «óptica adaptativa» para corregir en tiempo real las distorsiones inducidas por la atmósfera. Para ello necesitan observar de forma continua estrellas suficientemente brillantes que sirvan como referencia; algo que, sin embargo, escasea en numerosas partes del cielo. Para solucionarlo, el ELT contará con ocho láseres con los que podrá generar estrellas artificiales en cualquier parte del firmamento.



ESO

plea también en oftalmología y, más recientemente, en imagen celular. Distintos observatorios la han desarrollado, entre ellos la ESO. Uno de los telescopios de 8,2 metros que conforman el VLT de Cerro Paranal la usa de manera rutinaria. Hasta hace unos años, sin embargo, su empleo se restringía a muy pocas zonas del cielo: aquellas en las que se podía usar una estrella muy brillante como referencia. Esa dificultad se superó gracias al desarrollo de las estrellas láser.

Para que las técnicas de óptica adaptativa funcionen, es necesario tomar continuamente imágenes de objetos de referencia, procesarlas y generar así los comandos de actuación para los espejos deformables. Dado que la atmósfera cambia muy rápido, también el sistema de control ha de reaccionar deprisa. Pero eso exige que las estrellas de referencia sean lo suficientemente brillantes, algo que por desgracia no ocurre en la mayor parte del cielo. Para solucionar el problema, se generan estrellas artificiales mediante el disparo de varios haces láser. Estos excitan la capa de sodio situada a unos 80 kilómetros de altitud, en la mesosfera, generando puntos con una luminosidad equivalente a la de una estrella natural.

El ELT dispondrá de hasta ocho haces para producir otras tantas estrellas artificiales. Estos láseres, de alta potencia, fueron desarrollados y patentados por la ESO. Su diseño se optimizó para la fabricación y se adaptó a las necesidades del ELT en colaboración con la industria.

RETOS Y RECOMPENSAS

Aunque no exenta de los problemas que tendría cualquier proyecto de estas dimensiones, la construcción del ELT marcha según lo previsto. En lo que respecta a las distintas partes del telescopio, los mayores retos son ahora el espejo primario y el espejo cuaternario adaptativo. Desde el punto de vista global, la mayor dificultad reside en corregir las perturbaciones para mantener en todo momento los espejos en la posición y forma correctas. Es este un requisito crítico para obtener una imagen focal libre de aberraciones. De otro modo, las ventajas de ser un telescopio gigante se perderían.

¿Qué nos depara el mayor ojo del planeta? Los primeros descubrimientos dependerán en gran medida del orden con el que vayan llegando los distintos instrumentos al observatorio, cada uno de los cuales tendrá cualidades específicas. Quizá sea sobre galaxias, planetas o agujeros negros. El potencialmente más impactante, sin embargo, y aunque tal vez quede lejos en el tiempo, sería obtener la imagen de un planeta similar a la Tierra orbitando alrededor de una estrella del mismo tipo del Sol.

El ELT es una máquina extremadamente compleja que, con una masa de 3600 toneladas, una altura similar a la de una catedral y sometida a todo tipo de perturbaciones, tendrá que apuntar a objetos estelares con una precisión de milésimas de grado y suministrar imágenes de calidad excepcional a distintos instrumentos científicos. Estos son a su vez gigantescas máquinas de precisión que combinan una gran cantidad de desafíos tecnológicos. El reto está servido.

PARA SABER MÁS

The science case for the European Extremely Large Telescope: The next step in mankind's quest for the universe. ESO, septiembre de 2010. Disponible en **www.eso.org/public/products/books/book_0003**

The E-ELT construction proposal. ESO, diciembre de 2011. Disponible en **www.eso.org/public/products/books/book_0046**

Programa de construcción de telescopios gigantes en EE.UU.: **www.noao.edu/us-elt-program/overview.php**

EN NUESTRO ARCHIVO

Los grandes telescopios del futuro. Roberto Gilmozzi en *IyC*, julio de 2006.

La carrera por el mayor refractor del mundo. Wolfgang Steinicke y Stefan Binnewies en *IyC*, enero de 2013.

La guerra de los telescopios. Katie Worth en *IyC*, febrero de 2016.



MEDICINA

CONTROL DARWINIANO DEL CÁNCER

Los principios de la evolución y de la selección natural nos conducen hacia estrategias de farmacoterapia oncológica radicalmente nuevas

James DeGregori y Robert Gatenby

ESTE AÑO, A 31.000 ESTADOUNIDENSES se les diagnosticará un cáncer de próstata diseminado a otras partes del cuerpo, como los huesos o los ganglios linfáticos. La mayoría serán atendidos por oncólogos cualificados y con gran experiencia, que tendrán a su disposición los 52 fármacos autorizados para tratar esta afección. A pesar de todo, más de tres cuartas partes sucumbirán.

ILUSTRACIÓN DE MARIA CORTE

El cáncer diseminado, metastásico, rara vez tiene cura. Son muchas las razones por las que el paciente muere pese a recibir tratamiento, pero todas nos remontan a la idea difundida en 1859 por Charles Darwin para explicar el auge y la caída de los pájaros y los galápagos, que hoy llamamos evolución.

Pensemos en una célula cancerosa como en los pinzones de Darwin. Provistos de picos un poco distintos, habitan en cada isla de las Galápagos, donde comen semillas de formas o características diversas, propias de cada isla. Aquel cuyo pico encaje mejor con las semillas autóctonas conseguirá más alimento y engendrará una descendencia numerosa, que también poseerá ese pico concreto. Los dotados con picos menos adaptables no tendrán tanto éxito. Esta selección natural se encargó de que en cada isla evolucionaran especies distintas de pinzones, con un pico característico. La clave radica en que cuando dos grupos de seres vivos compiten en un espacio reducido, acaba imponiéndose el mejor adaptado al entorno.

Las células cancerosas evolucionan de modo parecido. En cualquier tejido, las células sanas prosperan porque están mejor capacitadas para captar las señales de crecimiento, los nutrientes y las pistas físicas que reciben del tejido sano circundante. Si una mutación crea una célula cancerosa poco adaptada a ese entorno, sus posibilidades de supervivencia serán mínimas: las sanas la desplazarán en su competencia por los recursos. Pero si el entorno queda alterado por el envejecimiento o la inflamación (circunstancia que a veces provoca el propio cáncer al crecer), entonces será la más apta y comenzará a desplazar a las sanas, que solían ocuparlo todo. En suma, su éxito acaba dependiendo de los cambios del entorno.

Esta teoría de la oncogénesis adaptativa se sustenta en la manera en que el cáncer prospera cuando modificamos su entorno celular en los animales de experimentación, sin que el funcionamiento interno de la célula tumoral sufra cambio alguno. Los médicos han observado esa aceleración del cáncer en pacientes con afecciones que alteran los tejidos, como las enteropatías inflamatorias. La conclusión que se extrae de todo ello es que acabamos conociendo mejor el cáncer si nos fijamos en su entorno en vez de centrarnos solo en las mutaciones celulares. Al reducir las alteraciones del tejido causadas por procesos como la inflamación es posible restaurar un ambiente más normal y, al igual que hemos demostrado en los estudios con animales, impedir que el tumor asuma una posición ventajosa para competir.

Nuestra perspectiva evolutiva también ha inspirado una estrategia distinta para el tratamiento del cáncer que hemos analizado con éxito en pequeños ensayos clínicos. Los médicos inundan de quimioterápicos el tumor en un intento por acabar de raíz con él, sin que quede el más mínimo rastro. Al principio parece funcionar, pues este encoge o desaparece, pero más tarde reaparece bajo una forma resistente a los fármacos que hasta entonces habían acabado con sus células, del mismo modo que los insectos dañinos adquieren resistencia a los plaguicidas. En un ensayo en pacientes con cáncer de próstata, uno de nosotros (Gatenby) probó una alternativa a ese método de la tierra quemada, consistente en aplicar solo la quimioterapia suficiente para que el tumor se mantenga minúsculo, sin matarlo del todo. La intención es conservar un pequeño remanente de células quimiosensibles y vulnerables que impidan la proliferación de ninguna célula provista de un nuevo rasgo indeseado: la quimiorresistencia. Ante un tipo de tumores que suelen comenzar a crecer sin control al cabo de 13 meses, este tratamiento los mantuvo controlados durante 34 meses de media, con una dosis del fármaco inferior a la mitad de lo habitual.

El resultado de nuestras estrategias de prevención y tratamiento nos estaría señalando una manera de domar el cáncer antes de que se vuelva peligroso para la integridad física, con lo que se salvarían muchos pacientes en que han fracasado las dosis ingentes de fármacos tóxicos.

James DeGregori es catedrático de bioquímica y genética molecular en el Campus Médico Anschutz de la Universidad de Colorado y autor de *Adaptive oncongenesis: A new understanding of how cancer evolves inside us* (Harward University Press, 2018).

Robert Gatenby es médico y dirige el Departamento de Radiología en el Centro del Cáncer Moffitt en Tampa, Florida. También es miembro del Departamento de Oncología Matemática Integrada en dicho centro.

¿POR QUÉ PADECEMOS CÁNCER?

Si le preguntamos a un médico o a un investigador la razón por la que el envejecimiento, el tabaquismo o la radiación están vinculados con el cáncer, probablemente obtendremos una respuesta concisa: «Porque provocan mutaciones». Tal afirmación es cierta solo en parte. La exposición al humo del tabaco o a la radiación provoca mutaciones en el ADN, mutaciones que se acumulan en las células a lo largo de la vida. Estas generan células con nuevas propiedades, como son las señales de crecimiento hiperactivo que potencian la división celular, la reducción de la tasa de muerte celular o incluso un incremento de la capacidad para invadir el tejido circundante.

Ahora bien, esa explicación sencilla, centrada en los cambios intracelulares, pasa por alto que los principales impulsores del cambio evolutivo en cualquier célula (o en grandes conjuntos de ellas, como un ser humano) radican en su entorno.

Sabemos que la evolución de la vida ha dependido estrechamente de las alteraciones ambientales, como variaciones drásticas en la tierra firme, en los gases atmosféricos o en el agua, así como en la temperatura ambiente. Tales cambios condujeron a la selección de nuevos rasgos adaptativos en los seres vivos que dieron pie a una diversidad biológica enorme. Tal y como escribiera Darwin en *El origen de las especies*: «Debido a esta lucha por la vida, las variaciones, por ligeras que sean y cualquiera que sea la causa de la que procedan, si son en algún grado provechosas a los individuos de una especie *en sus relaciones infinitamente complejas con otros seres orgánicos y*

EN SÍNTESIS

Las iniciativas médicas para vencer el cáncer se suelen centrar en las mutaciones malignas de la célula y en grandes dosis de fármacos tóxicos que persiguen acabar con el mal de raíz.

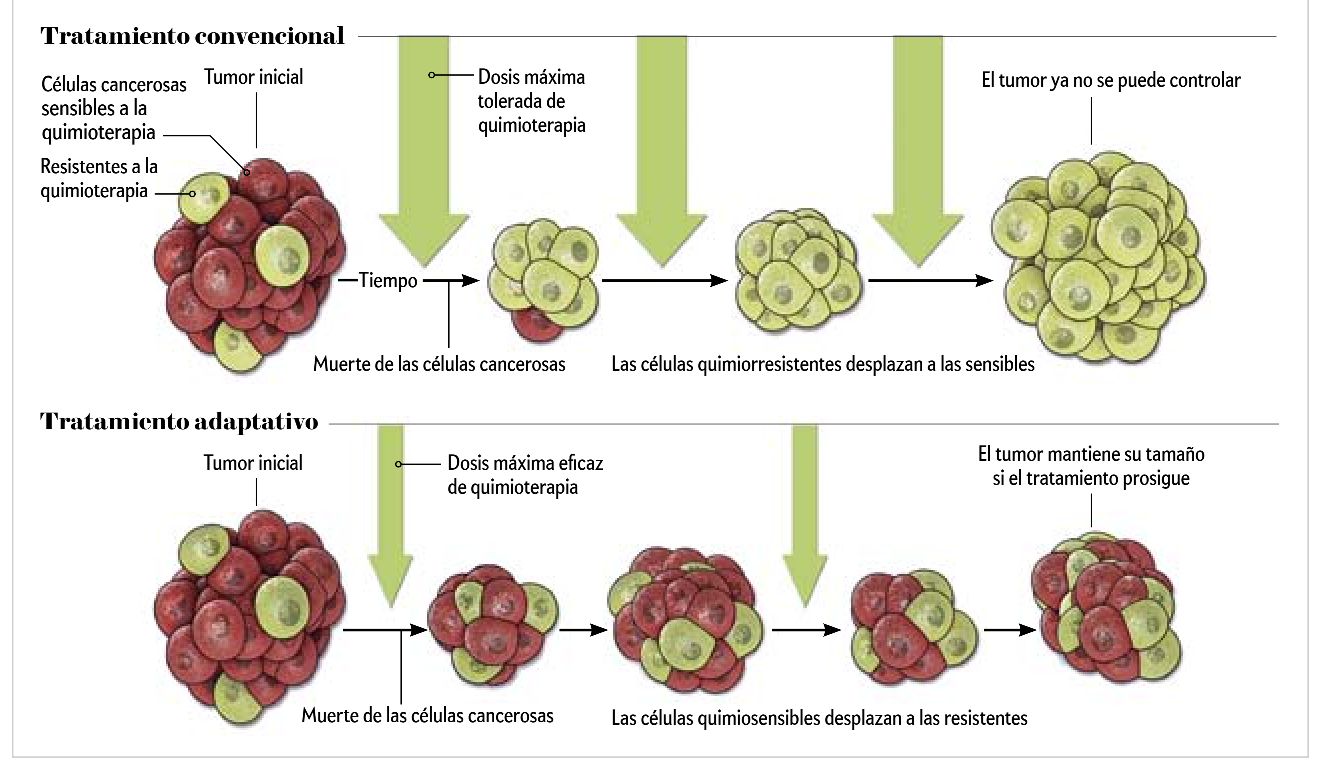
Un nuevo concepto subraya que el crecimiento tumoral es estimulado por cambios en el exterior de la célula, alteraciones del tejido circundante que aceleran la evolución de los rasgos cancerosos.

La estrategia evolutiva, puesta a prueba en animales y en pacientes con cáncer de próstata avanzado, limita la selección natural de las células tumorales gracias al uso moderado de la quimioterapia.

UNA ESTRATEGIA NUEVA

El control del cáncer

Los oncólogos suelen tratar los tumores agresivos de forma drástica. Atacan el tumor con la «dosis máxima tolerada», o sea, con la mayor cantidad de fármaco antineoplásico que puede tolerar el paciente. Como este también afecta a las células sanas, los efectos dañinos que ejerce en el cuerpo se convierten en el único límite para la dosis y la duración del tratamiento. Las investigaciones que contemplan el crecimiento tumoral desde una perspectiva evolutiva indican que esta táctica de tierra quemada puede ser la razón por la que los tumores repuntan y acaban matando al enfermo. Cualquier célula cancerosa que sobreviva al ataque inicial tendrá rasgos que la harán resistente al fármaco y crecerá con rapidez en un tejido arrasado que, además, está saturado de fármaco. Una alternativa, el tratamiento adaptativo, persigue administrar la dosis más pequeña que impida la evolución del tumor hacia la resistencia total. Los ensayos en pacientes con cáncer de próstata demuestran que la primera ronda de tratamiento encoge el tumor, pero deja con vida unas pocas células cancerosas sensibles al fármaco. Estas impiden que sus competidoras, las células resistentes, cojan las riendas cuando el tumor retoma su crecimiento. Puesto que este aún alberga células sensibles, una segunda ronda vuelve a reducir su tamaño, en tanto que las rondas posteriores ejercen un efecto parecido.



con sus condiciones físicas de vida, tenderán a la conservación de estos individuos y serán, en general, heredadas por la descendencia». Este propuso que la competición por los recursos impulsaría la selección de los individuos dotados con aquellos rasgos que asegurasen una mejor adaptación al medio. Cuando este cambia, también lo hacen las presiones, de modo que se inicia la selección de rasgos nuevos que faciliten la adaptación a las nuevas condiciones.

Una dinámica darwiniana parecida sería aplicable a la evolución del cáncer en el organismo. Pese a nuestra formación como biólogo molecular (DeGregori) y como médico (Gatenby), siempre nos han fascinado la evolución y la ecología. Después de leer largo y tendido sobre el tema, impulsados al principio por la mera curiosidad, ajena a nuestra ocupación, descubrimos un paralelismo inadvertido hasta ahora entre los motores de la evolución y nuestras observaciones sobre el desarrollo del cáncer y la respuesta al tratamiento de los pacientes.

Entre otras cosas, es común que los investigadores del cáncer crean que toda mutación cancerígena confiere una ventaja a la célula que la adquiere, pero nosotros reconocimos un principio evolutivo clásico en acción: la mutación ni favorece ni perjudica de por sí, sino que su efecto depende de las características del entorno local. Ninguno de los picos de los pinzones es «mejor» en sí mismo; algunos mejoran las posibilidades de supervivencia en ciertas condiciones. De igual forma, comprobamos que una mutación que transforma un gen en cancerígeno no da una ventaja inherente a la célula, y puede, de hecho, resultar desventajosa si merma su capacidad para explotar los recursos del tejido circundante.

Otra fuente de inspiración provino de la teoría del equilibrio intermitente (también conocida como equilibrio puntuado), postulada por los paleontólogos Niles Eldredge y Stephen Jay Gould, quienes observaron que las especies a menudo mantienen estables sus rasgos durante millones de años de registro fósil hasta que, de pronto, evolucionan con rapidez en respuesta a cambios ambientales drásticos. Este concepto alimentó nuestra visión de que algunos tejidos serían en origen poco favorables a las mutaciones celulares, pero que su alteración, causada por daños o por la inflamación, como en los pulmones de un fumador, fomentaría el cambio evolutivo, que a veces desembocaría en el cáncer.

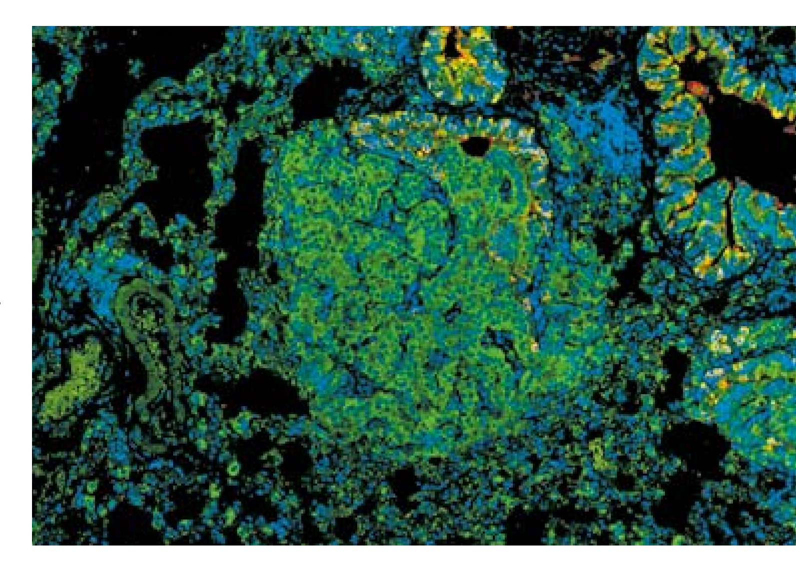
MESA SCHUMACHER

Primero vimos esa dinámica en los cambios de la médula ósea que acarrea el envejecimiento y que culminan con las leucemias. En su trabajo con ratones jóvenes y viejos en el laboratorio de DeGregori en Colorado, Curtis Henry, ahora en la Universidad Emory, y Andriy Marusyk, hoy en el Centro del Cáncer Moffitt, introdujeron idénticas mutaciones cancerígenas en unos pocos mielohemocitoblastos de ratón (células madre de la médula ósea). Demostraron así que la misma mutación afectaba de manera dispar a dichas células según la edad de los roedores: la proliferación de las células mutantes aumentaba en los ancianos, no así en los jóvenes. El factor determinante no parecía radicar en ellas, sino en el metabolismo y en la actividad génica de las células sanas colindantes. Por ejemplo, en los mielohemocitoblastos sin mutar de los ratones ancianos se detectó menos actividad de los genes importantes para el crecimiento y la división celular, actividad que se reanudaba tras la introducción de la mutación cancerígena. Es más, la mutación que era favorable para estas células perjudicaba a los ratones. Los mielohemocitoblastos engendran células esenciales del sistema inmunitario, pero la proliferación explosiva de las células mutantes precipitaba la aparición de leucemias.

Por su parte, los lozanos mielohemocitoblastos de los ratones jóvenes mostraban unos ritmos de crecimiento y de consumo de energía que armonizaban maravillosamente con los aportes de su entorno. No obtenían ninguna ventaja de la mutación introducida y las células mutantes no se multiplicaban. Al favorecer la situación imperante en ese momento, la juventud suprime los tumores.

¿Qué importancia tiene todo esto? Pues que si bien podemos evitar algunas mutaciones si dejamos de fumar y nos mantenemos alejados de otros mutágenos, no podemos eludir que otras se vayan acumulando en nuestras células a lo largo de la vida. Pero al poner la mira en los tejidos circundantes, nos planteamos otro modo de frenar el cáncer: la reversión de las alteraciones tisulares ocasionadas por el envejecimiento o por el tabaquismo, entre otros factores, reduciría el éxito de las mutaciones cancerígenas. Estas no dejarían de aparecer, pero sería mucho menos probable que confiriesen a las células alguna ventaja, con lo que no proliferarían.

No hay ninguna fuente de la eterna juventud que conjure el envejecimiento. Si cumplimos con lo que sabemos necesario, como hacer ejercicio, comer sano y no fumar, mejoraremos el mantenimiento de los tejidos, quizá la mejor estrategia a nuestro alcance de momento. Pero si averiguáramos qué factores ambientales son esenciales para la aparición del cáncer, tal vez podríamos modificarlos para ponérselo difícil a los tumores. En nuestros experimentos con ratones, vimos que si reducíamos la actividad de las proteínas proinflamatorias y lesivas en los roedores ancianos, las células portadoras de las mutaciones cancerígenas no proliferaban y las sanas seguían dominando. Ahora bien, conviene ser cauto: tal vez el bloqueo de la inflamación en unos ratones que viven en jaulas estériles reduzca el cáncer, pero adoptar esa estrategia en una persona corriente podría minar las defensas inmunitarias, pues la inflamación forma parte de ellas.



LOS TUMORES INCIPIENTES, como el visible en verde en este tejido pulmonar, crecen gracias a la adquisición de rasgos con los que desplazan a las células normales.

MOUMITA GHOSH

DE LA PREVENCIÓN AL TRATAMIENTO

Además de la prevención, el enfoque evolutivo mejoraría la eficacia de los tratamientos al reducir la tendencia perversa de las células tumorales a adquirir resistencia contra los antineoplásicos. Esa adquisición también se da en otros ámbitos. Quizás el ejemplo más conocido sea la lucha secular de los agricultores contra los insectos dañinos. Durante más de un siglo, los fabricantes de plaguicidas han proveído sin cesar de productos nuevos, pero las plagas siempre han acabado volviéndose inmunes. Al final se descubrió que la fumigación con grandes dosis destinadas a erradicarlas empeoraba el problema, debido a un proceso evolutivo denominado liberación ecológica.

Para entenderlo, conviene recordar que los insectos del enjambre que ataca un campo no son idénticos y compiten por el alimento y el espacio, como las células cancerosas. Y que dentro de una población existe variabilidad para casi todos los rasgos, incluida la sensibilidad a los plaguicidas. Con la fumigación de grandes cantidades de insecticida o la administración de dosis altas de quimioterapia, el agricultor y el oncólogo acaban con la inmensa mayoría de los insectos o de las células tumorales. Pero basta con que una pequeña minoría tenga rasgos que la hagan menos vulnerable para que, al haber exterminado a los demás, los resistentes se multipliquen sin obstáculo. En el agro se intenta resolver el problema moderando la aplicación de los plaguicidas, como parte del control integrado de las plagas. En vez de intentar erradicarlas, el agricultor aplica solo las dosis suficientes para controlarlas y reducir los daños, sin llegar al punto que precipitaría la liberación ecológica. Así se mantiene la sensibilidad al plaguicida.

La comunidad médica ha aprendido una lección similar con los antibióticos: el uso excesivo debe cesar si se quiere poner freno al ciclo evolutivo que facilita la aparición de patógenos resistentes. Ahora toca aprender eso mismo en el campo del cáncer.

A semejanza de los agricultores, que antaño rociaban los campos con cantidades desmesuradas de insecticidas, los médicos de hoy suelen administrar la quimioterapia en la «dosis máxima tolerada (DMT) hasta la progresión». Casi todos los fármacos antitumorales dañan también los tejidos sanos, causando efectos secundarios que van de ser sumamente desagradables a mortales. La DMT comporta administrar una cantidad de fármaco que está justo por debajo de la dosis que mataría o provocaría efectos secundarios intolerables. La administración del mismo tratamiento «hasta la progresión» se explica por la manera en que se suele medir el éxito del tratamiento: el cambio de la extensión del tumor. Se considera satisfactorio si se encoge y se retira si se hace más grande.

La mayoría de los pacientes y de los médicos cree que la mejor estrategia consiste en matar el máximo número de células cancerosas con la administración implacable de la mayor cantidad posible de fármacos citocidas. Pero al igual que en el control de los insectos y de las infecciones, esta estrategia, en el marco de un cáncer incurable, a menudo resulta contraproducente desde el punto de vista evolutivo, pues pone en marcha fenómenos que en realidad aceleran el crecimiento de las células resistentes.

La otra lección del control de plagas con criterios evolutivos es que un «plan de control de la resistencia» consigue mantener a raya las poblaciones indeseadas, a menudo indefinidamente. ¿Podría mejorar el porvenir de los pacientes con un cáncer incurable? La respuesta no está clara aún, pero los estudios experimentales y los primeros ensayos clínicos ofrecen indicios de que así es.

Una estrategia basada en la evolución consistiría en suspender el tratamiento cuando el tumor del paciente haya menguado un 50 por ciento tras recibir un fármaco antineoplásico durante un mes. Este planteamiento se adoptará solo cuando se sepa, por experiencia, que los tratamientos disponibles (quimioterapia, hormonoterapia, cirugía, etcétera) no consiguen curar el cáncer que padece. Puesto que es incurable, el objetivo consiste en evitar que crezca y metastatice durante todo el tiempo posible. Con el cese temporal, multitud de células cancerosas sensibles al fármaco permanecerán vivas, por lo que el tumor volverá a crecer y acabará alcanzando su antiguo tamaño. Durante ese período de recrecimiento, como no se administrará quimioterapia, la mayoría de las células seguirán siendo sensibles a ella, en lugar de resistentes. Nos serviríamos de las células sensibles que sabemos controlar para impedir el crecimiento de las resistentes que no controlamos. Así, el tratamiento mantendría bajo control el tumor mucho más tiempo que la estrategia convencional de administración continua de la dosis máxima y, como la dosis sería notablemente menor, acarrearía muchos menos efectos secundarios con la consiguiente mejora en la calidad de vida.

El laboratorio de Gatenby comenzó a indagar esta estrategia en 2006 con modelos matemáticos y simulaciones por ordenador. Tales modelos rara vez se habían aplicado a los tratamientos oncológicos, pero la gran cantidad disponible nos hizo decantar por ese planteamiento, habitual en física, pues los resultados matemáticos ayudan a definir los métodos experimentales que con mayor probabilidad resultarán satisfactorios. Los modelos definieron la cantidad de fármaco necesaria. Como siguiente paso, estudiamos esas dosis en ratones, lo cual confirmó que el control del tumor podía mejorar sobremanera con las estrategias basadas en criterios evolutivos.

Los resultados eran lo bastante buenos como para animarnos a ponerlo en práctica en un ensayo con pacientes. En colaboración con Jingsong Zhang, oncólogo del Centro del Cáncer Moffitt y especialista en cáncer de próstata, y con la ayuda de matemáticos y biólogos evolutivos, elaboramos un modelo de la dinámica evolutiva de las células tumorales prostáticas durante el tratamiento. Con él se simuló la respuesta del cáncer a una serie de dosis farmacológicas administradas por un oncólogo. A continuación, reiteramos una y otra vez esos resultados hasta acotar un conjunto de dosis que mantenían más tiempo controlado el cáncer, sin que aumentaran las células resistentes al fármaco.

Luego les pedimos a afectados por un tumor invasivo que ya presentaban metástasis (del tipo que los médicos no consiguen eliminar del todo) que se ofrecieran voluntarios para un ensayo clínico. Hasta el momento, los resultados han sido excelentes: de los 18 pacientes iniciales, 11 siguen en tratamiento. La pauta terapéutica de referencia suele mantener el tumor metastásico bajo control durante unos 13 meses de media. En nuestro ensayo, el control medio ronda como mínimo los 34 meses, y como más de la mitad sigue en tratamiento, aún no es posible fijar un límite a lo bien que les va. Además, ese control se logra con solo el 40 por ciento de la dosis que hubieran recibido con el otro tratamiento. Pero es pronto para cantar victoria: que funcione en el cáncer de próstata no significa que lo haga en otros. Tampoco es sencillo convencer a un paciente, incluso a uno que padece un mal incurable, de que lo mejor no es matar tantas células malignas como sea posible, sino tan pocas como sea necesario.

LAS REGLAS DEL CÁNCER

Por muchas razones, el modelo evolutivo de desarrollo y tratamiento del cáncer disipa el «misterio» que lo envuelve. Su propensión a atacar sin causa clara, y su capacidad para resistir y rebrotar tras ser el blanco de un tratamiento sumamente eficaz y a menudo de gran toxicidad son consideradas por médicos y pacientes como una complicación desesperante o una suerte de magia poderosa. En cambio, saber que obedece las reglas de la evolución como los demás sistemas vivos invita a confiar en que un día será posible controlarlo. Aunque incurable, la aplicación de los conocimientos sobre la dinámica evolutiva permitirá alterar estratégicamente el tratamiento para lograr el mejor desenlace posible. Los enfoques preventivos se pueden engranar para que ayuden a crear entornos tisulares favorables a las células sanas.

Desde hace más de un siglo, los investigadores del cáncer sueñan con fármacos que eliminen todas las células tumorales sin afectar a las sanas. El cáncer se ha aprovechado de la evolución para eludir sus efectos, pero ahora somos capaces de sacar partido de ella. Podemos aprovechar el legado de Darwin y de sus sucesores para diseñar estrategias más realistas con las que prevenir y dominar esta temible dolencia. IyC

PARA SABER MÁS

Integrating evolutionary dynamics into treatment of metastatic castrate-resistant prostate cancer. Jingsong Zhang, Jessica J. Cunningham, Joel S. Brown y Robert A. Gatenby, en *Nature Communications*, vol. 8, artículo n.º 1816, 28 de noviembre de 2017.

First strike–second strike strategies in metastatic cancer: Lessons from the evolutionary dynamics of extinction. Robert A. Gatenby, Jingsong Zhang y Joel S. Brown, en *Cancer Research*, vol. 79, págs. 3174–3177, 1 de julio de 2019(4).

EN NUESTRO ARCHIVO

Cáncer de próstata. Marc B. Garnick en *IyC*, junio de 1994.

Las ecuaciones del cáncer. Guillermo Lorenzo, Guillermo Vilanova y Héctor Gómez en *IyC*, abril de 2017.

El árbol del cáncer. Jeffrey P. Townsend en *IyC*, junio de 2018.



COMPUTACIÓN



IMAGINACIÓN ARTIFICIAL

Las máquinas podrían aprender la creatividad y el sentido común, entre otras cualidades humanas

George Musser

SI ALGUNA VEZ SE SIENTE ESCÉPTICO RESPECTO AL SER HUMANO, HABLAR CON LOS investigadores en inteligencia artificial (IA) constituye un buen antídoto. Pese a que los sistemas de IA ya nos han igualado o superado en el reconocimiento facial, la traducción de idiomas, los juegos de mesa o electrónicos y la señalización de las maniobras de conducción, estos expertos no tienen una actitud triunfalista, sino que siempre están hablando de las maravillas del cerebro humano, de lo eficiente y adaptable que es, de su infinidad de facultades. Las máquinas carecen aún de esas cualidades: son inflexibles, son opacas y aprenden despacio, precisando un entrenamiento exhaustivo. Y hasta sus tan pregonados éxitos se limitan a ámbitos muy concretos.

EN SÍNTESIS

Varios métodos emergentes confieren a los sistemas de inteligencia artificial, como las redes neuronales, características que se consideraban puramente humanas.

El metaaprendizaje prepara las redes para que puedan adaptarse rápidamente y aprender nuevas tareas sin necesitar una miríada de datos.

Las redes generativas antagónicas proporcionan una forma de imaginación y permiten a las máquinas reproducir las propiedades estadísticas de un conjunto de datos.

El «desenredo» logra que la red neuronal perciba la estructura subyacente de los datos y que su funcionamiento interno resulte más comprensible.

GABRIEL SILVEIRA

Muchos investigadores se embarcaron en el campo de la IA con el propósito de comprender, reproducir y, en última instancia, superar la inteligencia humana. Pero incluso aquellos con intereses más prácticos creen que las máquinas deberían parecerse más a nosotros. Una red social que entrene sus algoritmos de reconocimiento de imágenes no tendrá dificultades para encontrar fotos de gatos o de famosos; pero otras clases de datos son más difíciles de identificar, y las máquinas podrían resolver un abanico más amplio de problemas si fueran más ingeniosas. Los datos relacionados con el mundo material son especialmente limitados. Si un robot tiene que aprender a manipular bloques, no es factible enseñarle todas las disposiciones que podría encontrarse: como los seres humanos, necesita adquirir destrezas generales en lugar de memorizar mecánicamente.

Al arreglárselas con menos datos de entrada, las máquinas también deben ser más generosas con su salida. No basta con la respuesta: la gente también quiere conocer su razonamiento, sobre todo cuando los algoritmos emiten juicios sobre préstamos bancarios o penas de prisión. Uno puede interrogar a los burócratas humanos sobre sus prejuicios y conflictos de intereses, pero no tendrá tanta suerte con los sistemas actuales de IA. En 2018, la Unión Europea concedió a los ciudadanos derecho limitado a recibir una explicación sobre cualquier decisión basada en un proceso automatizado. En EE.UU., la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa financia un programa de «IA explicable», pues los militares preferirían no enviar soldados al frente sin saber por qué.

Un gran número de investigadores están abordando estos problemas. Se discute sobre si una inteligencia más parecida a la humana requerirá cambios radicales, aunque es reseñable lo lejos que hemos llegado con mejoras bastante graduales. La autosuperación, la imaginación, el sentido común: estas cualidades que parecían puramente humanas están incorporándose a las máquinas, al menos hasta cierto punto. La clave está en un entrenamiento inteligente. Guiadas por instructores humanos, las máquinas dan los mayores pasos por sí solas.

George Musser, doctor en ciencias planetarias, colabora con *Scientific American* para los contenidos sobre física.



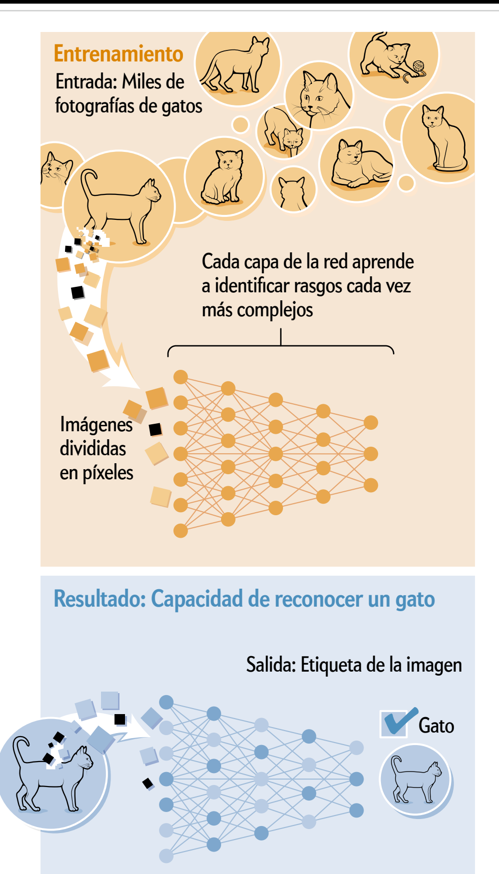
REDES PROFUNDAS

Las redes neuronales son la técnica de IA en auge. Están formadas por unidades básicas de computación, o «neuronas» (que pueden ser tan simples como un interruptor que se activa o desactiva según el estado de las neuronas a las que está conectado), por lo general agrupadas en capas. Una capa inicial acepta la entrada (por ejemplo, los píxeles de una imagen), una capa final genera la salida (una descripción de alto nivel del contenido de la imagen), y las capas intermedias u «ocultas» producen combinaciones aritméticas de la entrada. Algunas redes, en especial las usadas en problemas que se extienden en el tiempo, como el reconocimiento de idiomas, presentan bucles que reconectan la salida o las capas ocultas a la entrada.

NUEVAS TÉCNICAS

Redes más humanas

Pese a su inmenso potencial, las redes neuronales aún presentan limitaciones frustrantes. Para clasificar imágenes, la red toma los píxeles, los procesa en múltiples etapas y determina la probabilidad de cada una de las etiquetas que puede recibir la imagen (*izquierda*). Para ajustar las interconexiones, por lo general se precisan miles de imágenes de muestra, y la manera exacta en que la red efectúa la clasificación se pierde en la maraña de conexiones. Varias nuevas técnicas corrigen estas deficiencias.



Metaaprendizaje

Para reducir la cantidad de datos de entrenamiento, los investigadores pueden preparar la red haciendo que practique con ejercicios de un mismo tipo. La red no retiene nada de la información, pero resuelve cada vez mejor cualquier nueva tarea que se le encomiende. Aprende a aprender.

Preentrenamiento
Entrada: Conjuntos de distintas categorías

Entrenamiento
Entrada: Unas pocas fotografías de gatos

Resultado: Capacidad de reconocer un gato más deprisa

Gato

BROWN BIRD DESIGN

Las denominadas redes profundas poseen decenas o cientos de capas ocultas, que pueden representar estructuras de nivel intermedio —como aristas y figuras geométricas—, aunque no siempre es fácil saber qué es lo que hacen. Con miles de neuronas y millones de interconexiones, no existe una ruta lógica sencilla a través del sistema. Y eso es intencionado, ya que las redes neuronales destacan en problemas que no obedecen a reglas lógicas explícitas, como el reconocimiento de patrones.

El aspecto clave es que las conexiones neuronales no se fijan de antemano, sino mediante un proceso de prueba y error. Por ejemplo, la red recibe imágenes etiquetadas como «perro» o «gato» e intenta adivinar la etiqueta de cada una. Si se equivoca, se ajusta la fuerza de las conexiones que contribuyeron al resultado erróneo. Partiendo de cero, sin saber lo que es una imagen y mucho menos un animal, la red no funciona mejor que lanzar una moneda al aire. Pero después de unos 10.000 ejemplos, contesta igual de bien que una persona.

Sorprendentemente, una red puede clasificar imágenes que no ha visto nunca. Los teóricos aún no están seguros del mecanismo, pero un factor es que las personas que usan la red deben tolerar los errores o incluso introducirlos a propósito. Una red que catalogue a la perfección el conjunto inicial de gatos y perros podría estar basando sus decisiones en indicios y variaciones poco fiables en vez de en aspectos esenciales.

Esta capacidad de las redes para modelarse a sí mismas implica que pueden resolver problemas que sus diseñadores humanos no saben cómo abordar... incluido el de conseguir que las redes sean aún más eficaces.

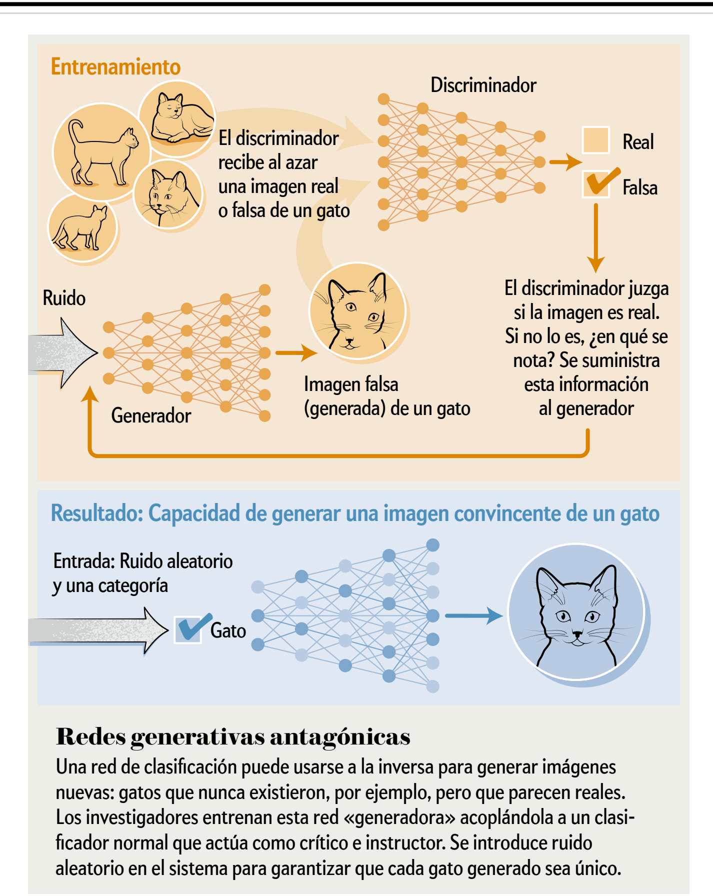
METAAPRENDIZAJE

Los profesores a menudo se quejan de que sus alumnos lo olvidan todo en verano. Pero según psicólogos como Robert Bjork, de la Universidad de California en Los Ángeles, olvidar no es perjudicial para el aprendizaje, sino una parte esencial de él. Y eso también se cumple en el aprendizaje automático.

Si una máquina aprende una tarea y luego la olvida, aprende otra y también la olvida, y así sucesivamente, es posible entrenarla para que capte los elementos comunes a todas esas tareas y aprenda más rápido nuevas variantes. La red no adquiere ningún conocimiento concreto, pero aprende a aprender, lo que los investigadores llaman «metaaprendizaje». Cuando queramos que retenga información, estará preparada. «Tras haber aprendido a realizar 1000 tareas, la 1001 resulta mucho más fácil», afirma Sanjeev Arora, informático teórico de la Universidad de Princeton. El olvido es lo que conduce al metaaprendizaje. Sin él, las tareas se confunden unas con otras y la máquina no logra percibir su estructura general.

El metaaprendizaje confiere a las máquinas parte de nuestra agilidad mental. «Probablemente será clave para conseguir una IA de nivel humano», señala Jane Wang, neurocientífica computacional de DeepMind (la sección de IA de Google) en Londres. Y a la inversa: cree que el metaaprendizaje ayudará a los científicos a descifrar qué ocurre dentro de nuestra cabeza.

En la naturaleza existe un algoritmo de metaaprendizaje fundamental: la evolución darwiniana. El entorno cambiante empuja a las especies a desarrollar la capacidad de aprender, en vez de confiar exclusivamente en instintos fijos. En la década de 1980, los investigadores en IA simularon procesos evolutivos

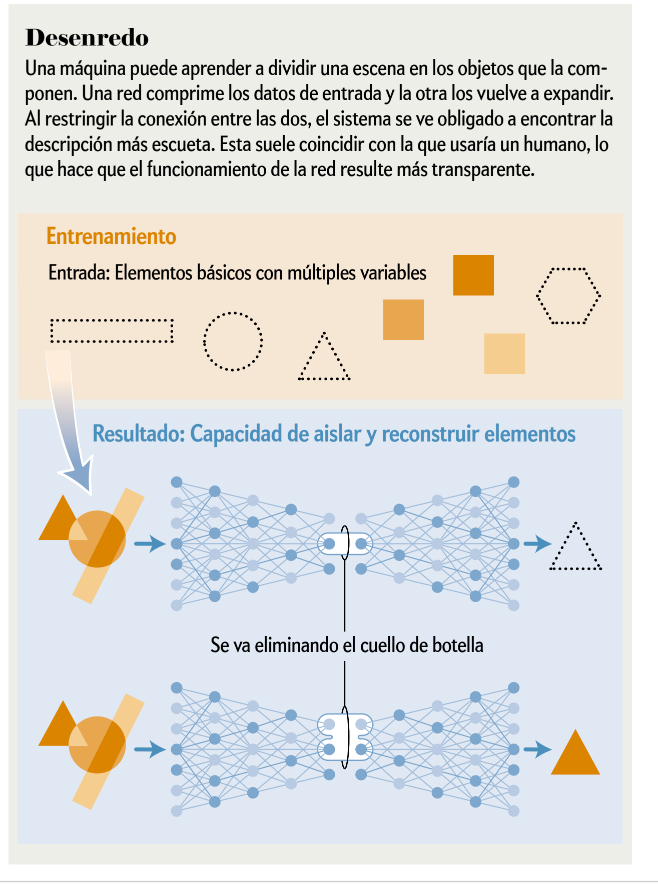


Redes generativas antagónicas

Una red de clasificación puede usarse a la inversa para generar imágenes nuevas: gatos que nunca existieron, por ejemplo, pero que parecen reales. Los investigadores entrenan esta red «generadora» acoplándola a un clasificador normal que actúa como crítico e instructor. Se introduce ruido aleatorio en el sistema para garantizar que cada gato generado sea único.

Desenredo

Una máquina puede aprender a dividir una escena en los objetos que la componen. Una red comprime los datos de entrada y la otra los vuelve a expandir. Al restringir la conexión entre las dos, el sistema se ve obligado a encontrar la descripción más escueta. Esta suele coincidir con la que usaría un humano, lo que hace que el funcionamiento de la red resulte más transparente.



para optimizar agentes informáticos para el aprendizaje. Pero la evolución es una búsqueda aleatoria que acaba en muchos callejones sin salida y, a principios de los 2000, los investigadores hallaron métodos más sistemáticos y rápidos. Con el régimen de entrenamiento apropiado, cualquier red neuronal puede aprender a aprender. Como en muchos otros aspectos del aprendizaje automático, la clave está en especificar muy bien nuestro objetivo. Si queremos que una red aprenda a reconocer caras, habrá que mostrarle un conjunto de caras. Y si queremos que aprenda a aprender, un conjunto de ejercicios de aprendizaje.

En 2017, Chelsea Finn, de la Universidad de California en Berkeley, y sus colaboradores desarrollaron un método que denominaron «metaaprendizaje independiente del modelo». Supongamos que queremos enseñar a una red neuronal a clasificar imágenes en cinco categorías (razas de perro, razas de gato, marcas de automóviles, colores de sombreros o lo que sea). En el aprendizaje normal, sin el «meta», le mostraríamos a la red miles de fotografías de perros y la ajustaríamos para que las etiquetara. A continuación, introduciríamos miles de imágenes de gatos, lo cual tendría el inoportuno efecto secundario de reemplazar a los perros; instruida de esta forma, la máquina solo podrá realizar una tarea de clasificación cada vez.

En el metaaprendizaje independiente del modelo, se intercalan las categorías. Se le muestran a la red únicamente cinco fotografías de perros, uno de cada raza, y a continuación una imagen de prueba para ver qué tal clasifica a ese perro; con solo cinco ejemplos, probablemente no muy bien. Entonces se reinicia la red, borrando cualquier pequeño conocimiento sobre perros que pueda haber adquirido. Pero —y esta es la clave— se ajusta el punto de partida para que la próxima vez lo haga mejor. Luego se le enseñan gatos (de nuevo, solo una muestra de cada raza). Se continúa con vehículos, sombreros y el resto de categorías, cambiando aleatoriamente de una a otra. Se trata de alternar las tareas y preguntar a menudo. La red no es experta en perros, gatos, vehículos ni sombreros, pero poco a poco aprende cuál es el mejor estado inicial para clasificar cualquier cosa que venga en tandas de cinco. Al final, aprende rápido: si le mostramos cinco especies de ave, las capta enseguida.

Según Finn, la red adquiere esta agudeza desarrollando un prejuicio (lo que en este contexto resulta positivo): espera que los datos de entrada adopten la forma de una imagen y se prepara en consecuencia. «Si disponemos de una representación capaz de identificar formas, colores y texturas, y de representar esa información de manera muy concisa, entonces, al ver un objeto nuevo, deberíamos reconocerlo rápidamente», explica.

Finn y sus colaboradores también aplicaron la técnica a robots, tanto reales como virtuales. En un experimento, le encomendaron a un robot de cuatro patas una serie de tareas que consistían en correr en varias direcciones. Gracias al metaaprendizaje, el robot supuso que lo que tenían en común esas tareas era correr y que la única pregunta era: ¿en qué dirección? Así que la máquina se preparó corriendo sin moverse del sitio. «De esta forma le es más fácil adaptarse a correr hacia delante o hacia atrás, puesto que ya está corriendo», indica Finn.

Esta técnica, como las estrategias relacionadas de Wang y otros científicos, tiene sus limitaciones. Aunque reduce el número de ejemplos necesarios para aprender una tarea determinada, en general aún precisa una gran cantidad de datos. «Los métodos actuales de metaaprendizaje requieren un entrenamiento exhaustivo», apunta Brenden Lake, científico cognitivo de la Universidad de Nueva York y destacado defensor de una IA más humana. El metaaprendizaje también tiene un elevado coste computacional, porque explota diferencias sutiles entre las diversas tareas. Si los problemas no están bien definidos matemáticamente, los investigadores deben tornar a los algoritmos evolutivos, que son más lentos. «Las redes neuronales han progresado, pero aún están lejos de poder aprender conceptos al nivel de un ser humano», admite Lake.

COSAS QUE NUNCA EXISTIERON

Justo lo que necesitaba Internet: más fotos de famosos. En los últimos años una extraña clase de ellas ha inundado la red: imágenes de gente que nunca existió. Son el producto de una técnica de IA con una astuta forma de imaginación. «Trata de crear fotografías de personas nuevas que pudieran pasar por famosos en nuestra sociedad», aclara Ian J. Goodfellow, investigador de Google Brain en California. «Se obtienen fotos muy realistas de personas con un atractivo convencional.»

La imaginación es bastante fácil de automatizar: se toma una red neuronal de reconocimiento de imágenes o «discriminadora» y se hace funcionar a la inversa, con lo que se transforma en una red de producción de imágenes o «generadora». Un discriminador recibe datos y devuelve una etiqueta, como la raza de un perro. Un generador recibe una etiqueta y devuelve datos. Lo difícil es garantizar que los datos tengan sentido. Si introducimos «pequinés», la red debería devolver la imagen de un pequinés típico. Necesita desarrollar e integrar el concepto de perro para poder generar uno cuando se le pida, lo que supone un desafío computacional.

En 2014, a Goodfellow, que estaba acabando su doctorado, se le ocurrió asociar los dos tipos de red. Un generador crea una imagen, un discriminador la compara con los datos y su meticuloso escrutinio entrena al generador. «Se establece un juego entre dos jugadores», refiere Goodfellow, «una red generadora que produce imágenes y una red discriminadora que las examina y trata de averiguar si son reales o falsas.» Estos sistemas se conocen como redes generativas antagónicas.

El generador comienza produciendo ruido aleatorio, que no conforma ninguna imagen y menos aún los datos de entrenamiento. Pero al principio el discriminador tampoco discrimina demasiado. Conforme este refina su gusto, el generador se ve obligado a jugar mejor, así que se espolean el uno al otro. Al final, en un triunfo del artista sobre el crítico, el generador reproduce los datos con tal verosimilitud que el discriminador solo puede intentar adivinar al azar si la salida es real o no.

El procedimiento es complejo y las redes pueden quedarse atascadas creando imágenes poco realistas o que no capten por completo la diversidad de los datos. El generador podría limitarse a hacer lo mínimo necesario para engañar al discriminador y colocar todas las caras sobre el mismo fondo rosado, por ejemplo. «No disponemos de una teoría matemática que explique por qué algunos modelos funcionan bien y otros no», reconoce Goodfellow.

Pero pocas técnicas de IA han encontrado tantas aplicaciones en tan poco tiempo: desde el análisis de datos cosmológicos hasta el diseño de coronas dentales. Siempre que necesitemos asimilar un conjunto de datos y producir datos simulados con las mismas propiedades estadísticas, podemos recurrir a una red generativa antagónica. «Basta con darle un buen montón de fotos y decirle: "¿Puedes hacerme algunas más?"», comenta Kyle Cranmer, físico de la Universidad de Nueva York que ha empleado la técnica para simular colisiones de partículas cuánticas más deprisa que resolviendo las ecuaciones correspondientes.

Una de las aplicaciones más notables es Pix2Pix, que puede realizar casi cualquier tipo de procesamiento de imágenes. Un programa como Photoshop puede convertir una imagen en color a escala de grises o incluso en un dibujo en blanco y negro. El proceso inverso requiere mucho más trabajo: para colorear una imagen es preciso tomar decisiones creativas. Pero Pix2Pix puede hacerlo. Si se le muestran varias parejas de imágenes en color y dibujos, aprenderá a relacionar ambos. Entonces se le puede proporcionar un dibujo y completará la imagen, aunque sea de algo para lo que no se le entrenó originalmente.

Otros proyectos sustituyen competencia por cooperación. En 2017, Nicholas Guttenberg y Olaf Witkowski, del Instituto de Ciencias de la Tierra y la Vida de Tokio, montaron un par de redes y les mostraron algunas pequeñas pinturas de distintos estilos artísticos. Las redes debían determinar el estilo, con la particularidad de que cada una veía una parte distinta de la obra. Así que debían colaborar, y para ello tuvieron que desarrollar un lenguaje privado, sencillo, pero lo bastante expresivo para esa tarea. «Encontraron un conjunto común de cosas sobre las que discutir», apunta Guttenberg.

Las redes que aprenden a comunicarse por sí mismas abren nuevas posibilidades. «Aspiramos a ver cómo una sociedad de redes desarrolla un lenguaje y se enseñan habilidades mutuamente», enuncia Guttenberg. Y si una red puede comunicarle lo que hace a otra red como ella, quizá también pueda aprender a explicárselo a una persona, de modo que su razonamiento sea menos inescrutable.

APRENDER SENTIDO COMÚN

Lo más divertido de una conferencia de IA es cuando un investigador muestra los errores tontos que cometen las redes neuronales, como confundir ruido aleatorio con un armadillo o un autobús escolar con un avestruz. Su conocimiento es a todas luces muy superficial y los patrones que perciben podrían no guardar relación alguna con los objetos físicos que conforman una escena. «Carecen de la comprensión básica de los elementos compositivos que poseen incluso animales como las ratas», asegura Irina Higgins, investigadora de IA en DeepMind.

En 2009, Yoshua Bengio, de la Universidad de Montreal, sugirió que las redes neuronales adquirirían cierta comprensión genuina si fuese posible «desenredar» sus representaciones internas; es decir, si cada una de sus variables correspondiera a una característica independiente del mundo. Por ejemplo, la red debería contar con una variable de posición para cada elemento de una escena. Si un objeto se mueve, pero todo lo demás permanece igual, solo debería cambiar esa variable, aunque se vean alterados cientos o miles de píxeles.

Para conseguirlo, Higgins y su equipo diseñaron en 2016 un método basado en la idea de que el conjunto real de variables (el que se ajusta a la estructura real del mundo) también es el más económico. Los millones de píxeles de una imagen son generados por un número relativamente pequeño de variables que se combinan de muchas maneras. «El mundo es redundante, de un modo que el cerebro puede condensar y explotar», señala Higgins. Para lograr una descripción escueta, su técnica limita deliberadamente la capacidad de representar el mundo de la red, de manera que se vea obligada a seleccionar solo los factores más importantes. La restricción se va retirando poco a poco, permitiendo incluir factores de menor relevancia.

Higgins y sus colaboradores probaron su técnica en un «mundo» simple que constaba de corazones, cuadrados y óvalos dispuestos en una cuadrícula. Cada forma podía tener 6 tamaños y 20 orientaciones distintas. Los investigadores le mostraron todas las permutaciones a la red, que debía aislar los cinco factores subyacentes: forma, posición respecto a los dos ejes, orientación y tamaño. Primero permitieron que la red escogiera solo un factor, que resultó ser la posición, la única variable sin la cual ninguna de las otras tendría mucho sentido. Luego la red añadió el resto de factores uno tras otro.

Evidentemente, los investigadores conocían las reglas del mundo, puesto que lo habían creado ellos mismos. En la vida real, quizá no resulte tan obvio dilucidar si el desenredo funciona o no. Por ahora, para valorarlo aún es necesario el juicio subjetivo de un ser humano.

El desenredo también tiene muchas aplicaciones. Para empezar, permite observar el razonamiento de las redes neuronales (que resulta ser muy similar al humano) y las hace más comprensibles. Un robot puede emplearlo para cartografiar su entorno y planificar sus movimientos en vez de ir dando tumbos por prueba y error. En combinación con lo que se denomina motivación intrínseca (en esencia, curiosidad), el desenredo permite que los robots realicen exploraciones sistemáticas.

Además, el desenredo ayuda a las redes a aprender nuevos conjuntos de datos sin perder lo que ya saben. Por ejemplo, si le mostramos a una red imágenes de perros, desarrollará una representación desenredada especial para la especie canina. Si cambiamos a gatos, las nuevas imágenes quedarán fuera del dominio de esa representación (el tipo de bigotes es un rasgo revelador) y la red se percatará del cambio. «Podemos observar cómo responden las neuronas y, si empiezan a actuar de manera atípica, probablemente deberíamos empezar a aprender un nuevo conjunto de datos», advierte Higgins. En ese momento, la red podría adaptarse, por ejemplo, añadiendo neuronas adicionales para almacenar la nueva información sin sobrescribir la anterior.

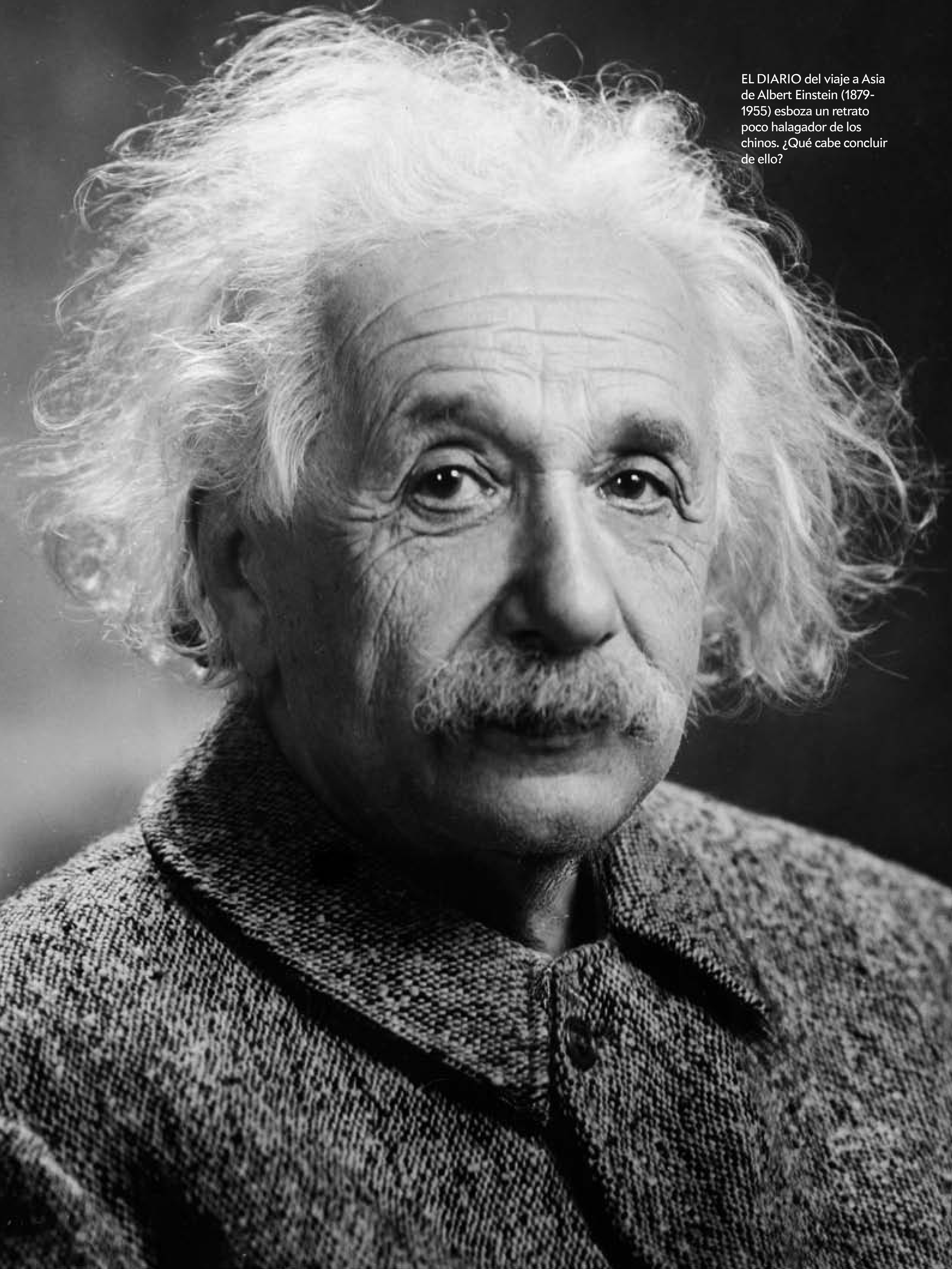
Muchas de las cualidades que los investigadores en IA están implementando en sus máquinas se asocian a la consciencia. Nadie está seguro de qué es la consciencia ni de por qué tenemos una intensa vida mental, pero tiene que ver con nuestra facultad de construir modelos del mundo y de nosotros mismos. Los sistemas de IA también necesitan esa capacidad. No parece que estemos cerca de ver máquinas conscientes, pero ¿podrían las técnicas actuales ser los primeros pasos para conseguirlas? IyC

PARA SABER MÁS

Generative adversarial nets. Ian J. Goodfellow et al., presentado en la Conferencia sobre Sistemas de Procesamiento de Información Neural. Montreal, 8-14 de diciembre de 2014.
Deep learning. Yann LeCun et al. en *Nature*, vol. 521, págs. 436-444, mayo de 2015.
β-VAE: Learning basic visual concepts with a constrained variational framework. Irina Higgins et al., presentado en la 5.ª Conferencia Internacional sobre Aprendizaje de Representaciones. Tolón, Francia, 24-26 de abril de 2017.
Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. Chelsea Finn et al., presentado en la 34.ª Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático. Sídney, 6-11 de agosto de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Técnicas de aprendizaje automatizado. Yaser S. Abu-Mostafa en *IyC*, abril de 2013.
Aprendizaje profundo. Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.
El problema de la caja negra. Davide Castelvecchi en *IyC*, abril de 2017.



EL DIARIO del viaje a Asia de Albert Einstein (1879-1955) esboza un retrato poco halagador de los chinos. ¿Qué cabe concluir de ello?

HISTORIA DE LA CIENCIA

Einstein, Newton o Pasteur no eran unos santos

¿Por qué nos decepciona saber que Einstein era xenófobo y que Newton era manipulador y esotérico? Para comprenderlo debemos remontarnos al siglo XVII, cuando los científicos empiezan a desempeñar un papel político

Yannick Fonteneau

La noticia no deja indiferente a nadie: el diario del viaje de Einstein a Asia entre 1922 y 1923 revela a un científico xenófobo y racista. La aparición en 2012 de la primera traducción al inglés, en el seno de las obras completas de Einstein, tuvo escasa repercusión. No así la versión que acaba de publicar Ze'ev Rosenkranz, editor y codirector del Einstein Papers Project, bajo el título *The travel diaries of Albert Einstein: The Far East, Palestine and Spain, 1922-1923*.

El diario refleja los prejuicios de un científico humanista que lucharía por los derechos civiles en Estados Unidos. Tras calificar a los chinos de «sucios y torpes», Einstein añade que «aun aquellos que trabajan incansablemente como animales no dan jamás la impresión de estar sufriendo conscientemente». Más adelante los describe como «una extraña nación más parecida a un rebaño de autómatas que de personas». Según Rosenkranz, «los pasajes del diario de Einstein sobre el origen biológico de la supuesta inferioridad intelectual de los japoneses, los chinos y los indios son muy explícitos y cabe considerarlos racistas [...]». Su comentario sobre la posibilidad de que los chinos «suplanten a todas las otras razas» resulta inquietante y muy revelador.

Sin embargo, de vuelta a Hong Kong, a principios de 1923, Einstein describe a los chinos como «el pueblo más desolador de la Tierra, cruelmente maltratado y explotado hasta la muerte a cambio de su modestia, delicadez y frugalidad». En Colombo, viajando en carro de culí, escribe: «Aunque me avergonzaba participar de tal maltrato a seres humanos, nada podía hacer».

Tras su visita al Muro de las Lamentaciones, al final de su viaje, describe a sus «insignificantes hermanos étnicos [...]. Mísera visión de un pueblo que tiene un pasado, pero no un presente». De interpretar estos pasajes como Rosenkranz, calificaríamos a Einstein de antisemita, lo que, como judío comprometido con la creación del Estado de Israel, ciertamente no era.

Poner en perspectiva las afirmaciones de Einstein no le exime, sin embargo, de su responsabilidad. No se trata solo de que algunos de sus contemporáneos muestren una mentalidad más abierta, sino de que el propio Einstein iba a comprometerse con la lucha por la igualdad entre negros y blancos, pocos años después de su viaje a Asia. En 1931, apoyará una campaña para defender a nueve adolescentes de Alabama injustamente acusados de violación (los llamados «chicos de Scottsboro»). Einstein ve una clara similitud entre el trato a los negros en Estados Unidos y a los judíos en Europa, y no permanece indiferente. ¿A qué se debe tal contraste entre sus ideas?

Estas contradicciones solo sorprenden a aquellos que ven en la figura del científico un parangón de la virtud. Einstein no es racista, más bien lo contrario, pero tiene los prejuicios propios de un burgués occidental de finales del siglo XIX, acostumbrado a juzgar a los otros pueblos a la luz de sus propios valores culturales. Alguien que, además, está de viaje, consignando sus impresiones en un diario privado.

Ciertamente, resulta decepcionante que se adhiera a la idea de un «carácter nacional», pero este no es el fondo del asunto. Sus afirmaciones nos decepcionan y cuestionan el resto de su obra y su compromiso humanista. Pero ¿por qué proyectamos en la figura del genio científico la imagen del héroe e incluso la del santo? ¿Por qué debería Einstein ser inmaculado e irreprochable? ¿Por qué nos decepciona cada nueva revelación —y son muy abundantes— sobre esos «genios de la ciencia»?

EL CIENTÍFICO COMO IDEAL ASCÉTICO

Las raíces de este reflejo cultural son profundas. Se remontan a hace más de tres siglos, al surgimiento de la ciencia moderna como un ámbito específico del conocimiento, que conlleva la creación en Europa de las academias científicas. En el siglo XVII se atribuyen a la ciencia y a la figura del científico características y funciones que, aún hoy, pertenecen solamente a la persona religiosa: descubrir verdades universales y mostrar moderación y desinterés frente a la vanidad del mundo.

Desde este punto de vista es un contrasentido considerar la revolución científica de los siglos XVI y XVII en términos de oposición entre ciencia y religión. Si bien algunos científicos de la época (entre ellos Galileo) habían entrado en conflicto con las autoridades eclesiásticas, la mayoría eran profundamente religiosos y consideraban la nueva racionalidad como un valioso aliado de la religión, apto para purgar la superstición y corroborar la existencia de Dios independientemente de las Escrituras. Estudiar la naturaleza, de esencia divina, suponía hacer inteligible el propósito de Dios. De aquí proviene la retórica del universo como reloj, un mecanismo demasiado perfecto para no ser la obra de un gran relojero.

Yannick Fonteneau es doctor en historia de la ciencia y profesor de física en el Liceo Francés de Bilbao.



A partir de la segunda mitad del siglo XVII, el científico no se contenta con descubrir la verdad, sino que argumenta su utilidad social y compite con los poseedores tradicionales de las esferas de poder y decisión. En el caso de la Real Academia de Ciencias francesa, fundada en 1666 y consolidada tras la reforma de 1699, se produce la legitimación recíproca entre ciencia y Estado.

El Estado se legitima situando la ciencia, aureola de su prestigio intelectual y de su facultad de juicio universal, en el centro de sus procedimientos de decisión. Apuesta por la capacidad de esta para cuantificar, optimizar y mejorar la producción, y manifiesta públicamente la voluntad de mejorar las condiciones económicas. Esta integración se realiza plenamente a partir de 1716, cuando el regente Philippe d'Orléans confía a la Academia una investigación sobre los recursos naturales de Francia. La Academia deja de ser una institución sostenida por el Estado para convertirse en una institución en el corazón mismo del aparato del Estado.

A partir de la segunda mitad del siglo XVII, el científico no se contenta con descubrir la verdad

La ciencia, por su parte, se legitima enfatizando la utilidad intrínseca de sus trabajos para el Estado. Los científicos reclaman así un nuevo estatus social. Estos cambios afectan a la forma de gobernar, dado que la política deja de basarse en la relación directa del soberano con sus súbditos y su reino, para hacerlo en la competencia científica de una administración.

En este contexto, modelar la imagen del científico sobre la del religioso permite a los académicos presentar a los aristócratas valores que estos aprecian, para ganar su aceptación y participar en el juego de poderes. Al mismo tiempo, esta imagen pretende promover una mayor presencia social de la ciencia y suscitar vocaciones, tanto más legítimas en cuanto que procederán de

EN SÍNTESIS

La publicación del diario de viaje de Einstein a Asia entre 1922 y 1923 ha causado sorpresa y acusaciones de racismo.

Para entender esta decepción debemos remontarnos al siglo XVII, cuando los científicos se arrogan la legitimidad para enunciar verdades universales y adoptan una imagen ideal ascética.

Desde entonces, los científicos y el Estado han construido una imagen de la ciencia acorde con sus respectivos intereses. La leyenda de Newton ofrece un ejemplo edificante.

la excepcional disposición intelectual de una pequeña casta de elegidos.

En los siglos XVIII y XIX los científicos no accederán a posiciones de poder más que de forma parcial, puesto que no reemplazarán completamente al religioso ni al consejero de Estado. No obstante, el científico y la razón (o sus imágenes) se proyectarán más allá de la historia, asumiendo un papel de guía para la sociedad. Una muestra evidente es el panegírico del ingeniero y arquitecto Vauban escrito por el científico Bernard Le Bouyer de Fontenelle en 1707: «Nadie mejor que él ha traído del cielo las matemáticas para que sirvan a las necesidades humanas. En sus manos han adquirido una utilidad tan gloriosa como sublime».



A SU MUERTE, Isaac Newton (1643-1727) fue elogiado hasta tal punto que su historia se convirtió en la leyenda de un santo. A partir del siglo XIX, los historiadores dibujaron un retrato mucho menos glorioso.

NEWTON, LA LEYENDA DEL PADRE DE LA RAZÓN

En otro elogio a Newton, en 1727, Fontenelle esboza el retrato de un genio santo, puro y desinteresado. Basándose en el testimonio de John Conduitt, un familiar próximo del sabio inglés, Fontenelle describe a Newton como un ser de carácter «eminentemente amable» que hubiera preferido el anonimato «antes que ver la calma de su vida perturbada por las tormentas literarias que el espíritu y la ciencia desatan sobre aquellos que se elevan demasiado». Su modestia «se mantuvo sin alteraciones, aunque todo el mundo se conjurara contra ella», y «no reaccionó nunca de modo que hiciera sospechar a los observadores más astutos del menor sentimiento de vanidad». «Era simple y afable con todo el mundo. Los genios de primer orden no menosprecian a aquellos que están por debajo de ellos, mientras que los demás menosprecian incluso a aquellos que están por encima. [...] sabía ser, en los momentos adecuados, un hombre común.»

Newton nunca se casó «y quizá no lo consideró nunca, ocupado como estaba durante su etapa de madurez con sus profundos estudios y, posteriormente, con un cargo importante». Un hombre demasiado sabio y ocupado para caer en las bajezas de la carne.

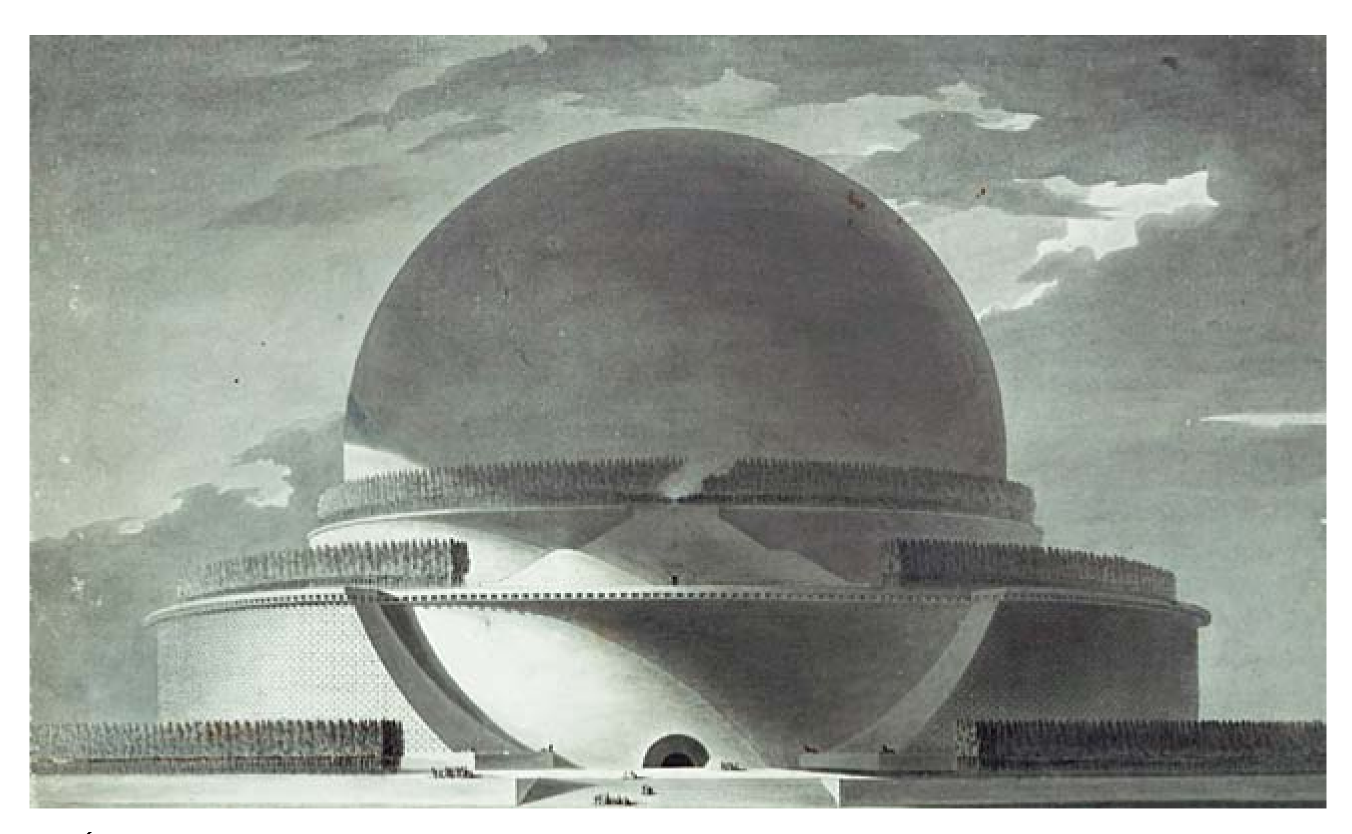
La descripción final de la agonía de Newton le acerca visiblemente a la figura del mártir: «En los momentos de dolor más violentos, mientras el sudor le caía de la frente, no gritó ni mostró ningún signo de impaciencia, y cuando podía descansar y calmarse, sonreía y hablaba con su jovialidad característica».

Retomada entre otros por Voltaire, la leyenda se propagará durante el siglo XVIII. Enterrado junto a reyes en la abadía de Westminster, Newton será celebrado como un semidiós de la ciencia y un genio universal. Hasta la aparición de Einstein, no habrá científico tan famoso. La leyenda, sin embargo, no ha sobrevivido a los hechos. Desde el siglo XIX hemos visto aparecer un retrato mucho menos halagador, que nos hace sonreír ante el elogio de Fontenelle.

¿Afable, Newton? Más bien no. Aunque podía ser amable ocasionalmente, era sobre todo conocido por su paranoia y sus ataques repentinos de furor frente a cualquiera susceptible de amenazar sus ideas, su honor o su posición social.

El astrónomo real John Flamsteed, miembro de la Real Sociedad, lo constató cuando Newton requirió observaciones precisas de la Luna para desarrollar su teoría del movimiento del satélite, un problema inmensamente complejo apenas planteado en su obra magistral de 1687, los *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Flamsteed había emprendido la obra ingente de catalogar las posiciones de todas las estrellas visibles. La posición de la Luna formaba parte del proyecto, y su precisión dependía de la de las estrellas. En los años 1690, Flamsteed facilitó a Newton 150 observaciones de la Luna a cambio de la promesa de que reconocería la primacía de sus resultados y no compartiría las observaciones con nadie. Temía que la divulgación prematura de su trabajo dañara su reputación.

Newton, sin embargo, nunca lo consideró como un par. No contento con ocultar la contribución de Flamsteed, llegó a responsabilizarle del fracaso de su propia teoría cuantitativa de la Luna debido a las insuficientes observaciones proporcionadas. A partir de 1704, como presidente de la todopoderosa Real Sociedad, Newton obligó a Flamsteed a entregar su catálogo incompleto precintado, y en 1708 a presentar sus observaciones de 1689 a 1705 ante una comisión dirigida por él mismo. En 1710 obtuvo de la reina Ana un decreto que obligaba a Flamsteed a ceder anualmente todas sus observaciones, con el pretexto de que el



«¡ESPÍRITU SUBLIME! ¡Genio vasto y profundo! ¡Ser divino! ¡Oh, Newton! Si has determinado la forma de la Tierra gracias a la amplitud de tu inteligencia y la sublimidad de tu genio, yo he concebido el proyecto de envolverte en tu descubrimiento.» El arquitecto Étienne-Louis Boullée introdujo así, en su *Ensayo sobre el arte* (1796), el proyecto de cenotafio para Newton, concebido en 1784. Los cipreses que rodean el edificio evocan el mausoleo de Augusto en Roma.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

catálogo era esencial para mejorar la navegación. Finalmente, no permitió que Flamsteed corrigiera sus propias tablas, haciendo responsable de su publicación a Edmond Halley, enemigo íntimo del astrónomo real.

El asunto alcanzó su punto álgido en octubre de 1711, en una tormentosa reunión en la Real Sociedad, en la que Newton exigió que los instrumentos del observatorio, pertenecientes a Flamsteed, pasaran a ser propiedad de la institución a cambio de su reparación. Flamsteed se negó, acusando a la institución de querer robarle la obra de toda una vida. Según Flamsteed, Newton estalló en cólera y lo insultó de todas las maneras posibles, empezando por «novato» (*puppy*). Poco después vio la luz el catálogo pirata editado por Halley. Lleno de errores, su publicación fue harto dolorosa para Flamsteed, que empleó una fortuna en comprar 300 de los 400 ejemplares impresos para luego quemarlos. Tras la muerte de Flamsteed en 1719, su enemigo Halley ocupó su plaza en el observatorio. El catálogo original no fue publicado hasta 1725, por el asistente de Flamsteed. Indicaba la posición de 3000 estrellas con una precisión inigualable.

Newton tenía la intuición de un príncipe y era un hábil manipulador del poder

Evidentemente, Flamsteed no está libre de reproches en su relación con el presidente de la Real Sociedad, pero cabe debatir hasta qué punto Newton era siempre «simple y afable con todo el mundo». Lo mismo ocurre con la disputa con su colega alemán Gottfried Leibniz a propósito de la prioridad en la invención del cálculo infinitesimal. Leibniz exigió, algo ingenuamente, que una comisión se pronunciase al respecto, dando a Newton la oportunidad de nombrarla él mismo. La comisión no solo concluyó que Newton había inventado el cálculo antes que Leibniz, cuestión en la que hay consenso entre los historiadores, sino que además sugirió que Leibniz le había robado su invención a Newton, algo que los historiadores han desmentido.

En cuanto al supuesto desinterés de alguien inmerso en su trabajo, no hay más que examinar su carrera política. Newton alcanzó los más altos cargos del Estado: maestro de la Real Casa de la Moneda, miembro del Parlamento y, por supuesto, presidente de la Real Sociedad. Tenía un gran olfato político y fue tan diestro como manipulador e irascible en el ejercicio del poder, colocando a sus protegidos en todos los puestos posibles.

FASCINACIÓN POR LO OCULTO

Si solo fuera por esto, Newton seguiría siendo el padre de la razón, título que comparte con Galileo. Perspicaz, creativo y hasta obsesivo, Newton era capaz de intentar resolver un problema durante años hasta llegar a una solución satisfactoria. Pero lejos de operar fríamente según las reglas del cálculo racional, se vio

arrastrado por ideas profundamente esotéricas. Su búsqueda de Dios le llevó al estudio de la mecánica celeste pero también al de la alquimia, sin que viera en ello la menor contradicción. Comprender el movimiento de los planetas o buscar el secreto de la piedra filosofal y el elixir de la juventud formaban parte de la misma lógica: Dios ha codificado el universo de un modo que podemos descifrar.

Consciente de las repercusiones que esas actividades podían tener para su reputación, Newton ocultó a casi todo el mundo sus trabajos alquímicos, pero tomó una gran cantidad de notas que se han conservado. El economista británico John Maynard Keynes lo constató al adquirir en 1936 un lote de manuscritos de Newton. Fascinado, escribió en 1946 un texto que, a causa de su muerte, no llegó a leer en la celebración del tricentenario del nacimiento del sabio inglés, pospuesta a causa de la guerra: «Newton no fue el primer sabio de la era de la razón, sino el último de los magos, los babilonios y los sumerios [...]. Sus instintos más profundos, ocultos, esotéricos y semánticos le hicieron retroceder ante el mundo, paralizado por el miedo a someter a inspección y exponer a la crítica sus ideas, creencias y descubrimientos al desnudo [...]. Creía que el pensamiento puro y la concentración mental revelarían el enigma al iniciado».

Al calificar a Newton del último de los sumerios, Keynes no pensaba solo en sus trabajos alquímicos. Desde principios de los años 1670, Newton se convirtió al antitrinitarismo, una doctrina que rechazaba la idea de que Jesucristo era de la misma naturaleza que Dios, aunque este le hubiera atribuido poderes divinos. Subscribía la idea de que la religión cristiana había sido corrompida en el siglo IV por los padres de la Iglesia, ayudados tanto por los religiosos como por los emperadores de la época. Siguiendo una tradición exegética protestante, Newton reinterpretó el Apocalipsis como la profecía simbólica de los acontecimientos históricos venideros. De este modo, el edicto de Tesalónica, decretado por Teodosio I en 380 y que hizo del cristianismo niceno (trinitario) una religión de Estado, correspondería a la apertura del séptimo sello, momento decisivo que a su vez abría la segunda serie de cataclismos simbolizados por las siete trompetas. Newton llegó a considerar que las hordas de godos que saquearon Roma en 410 habían sido enviadas por Dios para combatir la herejía trinitaria. Vivía en un mundo imaginario donde el bien y el mal libraban una batalla real y contemporánea, antesala de la segunda llegada de Cristo, que según sus cálculos no se produciría antes de 2060.

El siglo XIX contribuyó a hacer de los científicos los héroes ficticios de la epopeya del progreso

He aquí Newton. Un ser extraordinario por su perseverancia y su creatividad, a la vez que un ser esotérico que enlazó la decadente tradición renacentista con los avances de la ciencia moderna. Un megalómano manipulador ansioso de poder. En cualquier caso, una mente original, pero no el santo que todavía imaginamos que era, pese a las revelaciones del último siglo.

ICONOS DEPUESTOS

El de Newton no es un caso único. Tras la secularización de los valores asociados a la ciencia, que durante la Ilustración se desprende de la religión, la figura del santo genio persiste por otras razones. Pasteur, héroe de la República francesa, inocula la rabia al pequeño Joseph Meister para verificar si la vacuna adminis-

CREENCIAS DE NEWTON

Escogido por Dios para restablecer la religión

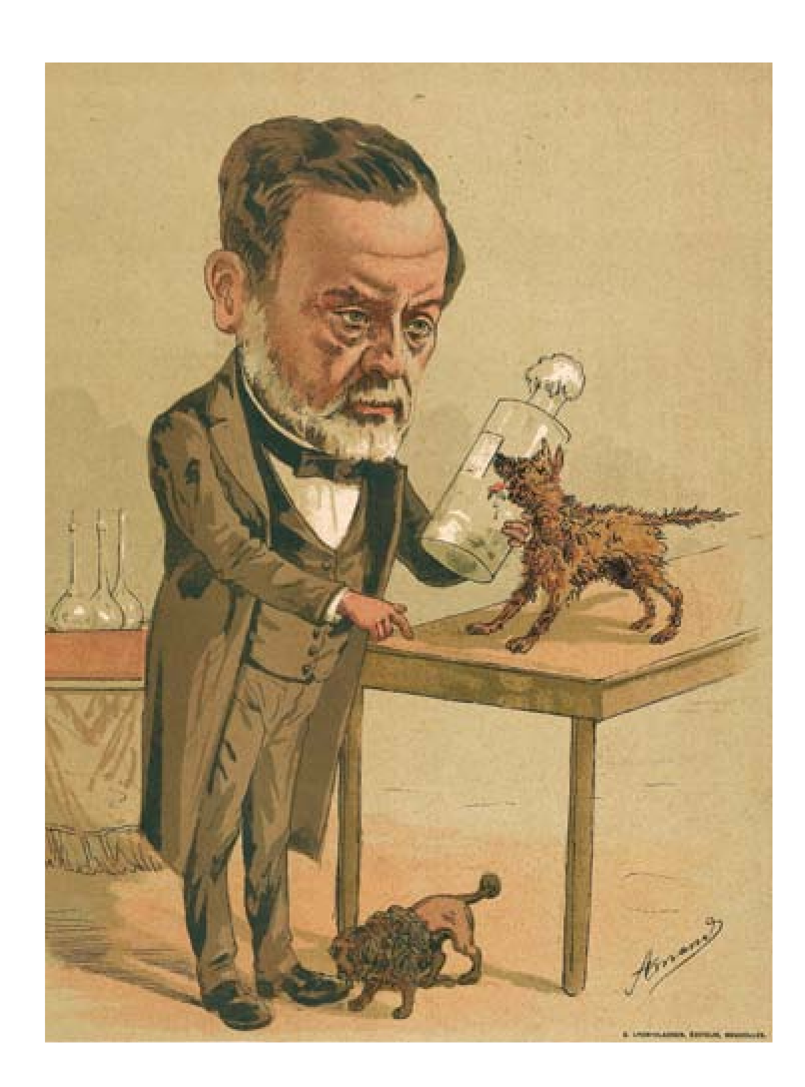
Newton creía que había sido escogido por Dios para restaurar la verdadera religión y que acompañaría a Cristo en su reino milenario hasta el fin del tiempo. Así de simple.

Pertenecía a una tradición del Renacimiento florentino, la *prisca sapientia*, que consideraba que las civilizaciones antiguas habían alcanzado grados de conocimiento posteriormente perdidos o degradados. Era un tema recurrente en el ámbito de las matemáticas, la astronomía o la arquitectura, y tanto Copérnico como Kepler se habían proclamado herederos de la tradición heliocéntrica griega. Newton llevará esta tradición al paroxismo.

Creía en la existencia, desde Noé hasta Pitágoras, de una única religión original (no trinitaria) vinculada al conocimiento del verdadero sistema del mundo. Este conocimiento perdido habría sido tan perfecto que los antiguos conocían ya el principio (newtoniano) de la gravitación universal, como el mismo Newton sostuvo ante el astrónomo suizo Nicolás Fatio de Duillier en 1692. En *The original of religions*, afirmó que pueblos antiguos tan diversos como los egipcios, los griegos, los chinos, los indios, los hebreos, los daneses o los latinos tenían en realidad las mismas prácticas religiosas, y que Stonehenge era uno de los templos de la verdadera religión antigua. Los dioses antiguos eran personajes reales que habían sido sacralizados tras morir.

Ambas ideas le llevaron a afirmar que tras la pluralidad de dioses, acontecimientos y lenguas se ocultaban unos mismos personajes y unas mismas concepciones. El estudio atento de textos antiguos, como los atribuidos a Hermes Trismegisto, personaje mítico de la antigüedad grecoegipcia al que se identificaba con el dios Toth, podía ofrecer indicios sobre el sistema del mundo. Newton utilizó estos textos en sus investigaciones alquímicas.

La obra matemática y teológica de Newton, pues, no era para él sino una forma de recuperar los arcanos originales de la verdadera religión, que incluía a Moisés y al mismo Jesucristo, y que era conocida de los caldeos y de todos los pueblos de la Tierra antes de la llegada del Mesías. A sus ojos, como explica el historiador británico Rob Iliffe en su obra de 2016 *The Cambridge Companion to Newton*, los antiguos naturalistas ejercían de sacerdotes de sus respectivas culturas. El esfuerzo del filósofo natural moderno por descodificar la obra de Dios tenía un carácter intrínsecamente religioso.



EN 1885, LOUIS PASTEUR cura a Joseph Meister de la rabia «vacunándole», es decir, inoculándole sucesivamente médulas de conejos muertos a causa de la enfermedad. La última inoculación, realizada con médula fresca portadora de la rabia, no era necesaria para la curación, pero Pasteur la practica para demostrar que su vacuna tiene la capacidad de prevenir una nueva infección.

trada previamente había funcionado, sabiendo que nunca había tenido éxito en un ser humano. Meister no desarrolló síntomas y Pasteur fue aplaudido, pese a que luego se ha cuestionado la benevolencia de tales métodos.

Tenemos otro ejemplo en Le Verrier, descubridor de Neptuno en 1846. Este genio nacional henchido de ambición política fue también el intratable autócrata del Observatorio de París, cuyo personal le detestaba. Y otro en Richard Feynman, premio nóbel e icono de la física de la segunda mitad del siglo xx, que se ha revelado un misógino. ¿Y qué pensar de James Watson, premio nóbel de medicina en 1962, que revolucionó la biología gracias al descubrimiento de la estructura de doble hélice del ADN, pero cuyas tesis racistas fueron portada del *Sunday Times* en 2007? ¿O de Werner Heisenberg, que se acomodó al poder nazi y participó polémicamente en las investigaciones nucleares de la Alemania de Hitler, mientras sus colegas huían de Europa?

Hoy como ayer, los entornos de investigación reflejan, como cualquier otro entorno, las peculiaridades de cada período histórico. Entre aquellos que conciben nuevos mundos o alimentan viejas rencillas, los hay ambiciosos e indiferentes, mediocres y competentes, egoístas y modestos. Hoy como ayer, el mito del santo científico no se sostiene.

HÉROES NECESARIOS

Hemos visto cómo surgió este mito. El científico se erigió en portavoz de la verdad y luego en guía de la sociedad, junto a los sacerdotes cuando no en competencia con ellos. Su legitimación fue acentuada por el Estado, decidido a utilizar la ciencia para consolidar su poder en los siglos xvii y xviii. En el siglo xix, el Estado nación sintió la necesidad de personificar el genio nacional. Todo ello contribuyó a dejar de lado la faceta humana de los científicos para convertirlos en héroes ficticios de la epopeya del progreso, capaces de conducir a la sociedad hacia su perfección.

Estos cambios han configurado una categoría cultural donde aquellos que buscan la verdad se amparan bajo la categoría del bien, al margen de su naturaleza humana. Esta categoría persiste aún a los ojos del público y de las instituciones políticas, que desconocen cómo funciona realmente la ciencia. Muchos creen todavía que la ciencia surge del golpe de genio de un puñado de héroes, cuando es fruto de la crítica de los resultados, de la replicación de los experimentos y de la lenta construcción de teorías por parte de una legión de escribas. En este sentido, los premios Nobel son una reliquia que no se corresponde en absoluto con los modos de producción de la ciencia.

Más aún, si ampliamos nuestra perspectiva, estas figuras de la ciencia son, de hecho, la expresión de nuestra necesidad antropológica de héroes. Representan, en las modernas sociedades occidentales, el culto a los ancestros, a quienes hemos dedicado esculturas, celebraciones y recuerdos de hechos gloriosos. Expresan también una antigua jerarquía social que celebra la mente en detrimento de la mano. Personifican, por último, nuestros valores sociales y modelos de vida, que guardan la memoria del sacrificio cristiano y el trabajo silencioso. Cuando prevalece la realidad, nos sorprendemos como niños que descubren que sus padres no son los seres perfectos que ellos creían.

PARA SABER MÁS

La revolución científica: Una interpretación alternativa. Steven Shapin. Paidós, 2000.
Newton: A very short introduction. Rob Iliffe. Oxford University Press, 2007.
The religion of Isaac Newton. Rob Iliffe en *The Cambridge Companion to Newton*. R. Iliffe y G. E. Smith (eds.). Cambridge University Press, 2016.
The travel diaries of Albert Einstein: The Far East, Palestine and Spain, 1922-1923. Ze'ev Rosenkranz. Princeton University Press, 2018. (La versión de 2012 está disponible en **einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-trans/326**)

EN NUESTRO ARCHIVO

Einstein. Silvio Bergia. Colección *Temas* de *IyC*, n.º 40, 2005.
Newton. Niccolò Guicciardini. Colección *Temas* de *IyC*, n.º 50, 2007.
Pasteur, el científico prudente. José Manuel Sánchez Ron en *IyC*, enero de 2019.





LA RANA BERMEJA es capaz de distinguir el verde y el azul en la oscuridad casi absoluta.

ZOOLOGÍA

Visión nocturna

Numerosos animales a los que se atribuía una mala visión en condiciones de baja luminosidad recurren a trucos neuronales para ver en la oscuridad

Amber Dance

LOS ÚLTIMOS RAYOS DE SOL SE FILTRAN A TRAVÉS DEL DENSO FOLLAJE a medida que la noche se cierne sobre la selva húmeda y sofocante de Barro Colorado. El anochecer oscurece las altas e imponentes ceibas, las palmas y los arbustos de esta isla panameña hasta que el ojo humano apenas vislumbra poco más que retazos del cielo estrellado entre las copas. Los grillos con su canto toman el relevo a los monos aulladores, que enmudecen al caer la noche.



Amber Dance, doctora en biología, es escritora científica especializada en microbiología, biología celular, neurociencia y técnicas de laboratorio.

En el crepúsculo, una abeja del sudor nocturna, de ojos saltones, cabeza verde metálico y abdomen pardo claro, sale de su nido, alojado en una rama hueca. Hambrienta, marchará rauda en busca de néctar y polen. Pero antes de alzar el vuelo, se gira y echa un vistazo a una rama de la que cuelga una tarjeta blanquinegra, la cual ha sido colocada por unos investigadores. De los nidos de ramas vecinas penden otras tarjetas, de color gris en este caso.

Una vez que la abeja se aleja, el zoólogo Eric Warrant y sus colaboradores de la Universidad de Lund trastocan el orden de las cosas y colocan la tarjeta rayada en otro nido. Cuando nuestra protagonista regresa, vuela derecha hacia el nido señalado por las franjas, suponiendo que es el suyo, lo cual demuestra que estas abejas perciben y emplean esas señales visuales. «No tienen problemas para verlas, incluso con la luz más tenue imaginable», asegura Warrant. (Y puntualiza que si los colaboradores que las siguen no usaran gafas de visión nocturna acabarían «dándose de narices con un árbol», tal es la oscuridad.)

La notable visión nocturna de esta abeja halíctida, *Megalopta genalis*, solo se explica en parte por sus adaptaciones oculares. Presenta unos omatidios (las unidades que forman el ojo compuesto) más grandes, lo que mejora la sensibilidad a la luz. Aun así, los ojos saltones no bastan para explicar cómo encuentra su nido con tan ínfima luminosidad. Warrant ha llegado a la conclusión de que, además de los órganos visuales, el modo en que su cerebro procesa la tenue luz ambiental le permite alzar el vuelo después del ocaso.

Durante décadas hemos supuesto que la mayoría de los animales veían el mismo paisaje mortecino, en blanco y negro, que el ser humano contempla cuando cae la noche. Se pensaba que la fauna nocturna confiaría en otros sentidos, como el olfato o el oído. Hoy, una nueva hornada de investigaciones está refutando esas suposiciones. «Siempre habíamos considerado que conocíamos bien la visión nocturna de los animales, pero en realidad pocos la habían estudiado», confiesa Warrant. Una vez que los investigadores han comenzado a escudriñar el mundo de las tinieblas, han descubierto que una amplia variedad de especies contempla un paisaje nocturno sorprendentemente claro.

Polillas, ranas y salamanquesas, entre otros, distinguen colores en la noche cerrada, cuando los propios científicos no ven más que matices de gris. Esa sensibilidad a las variaciones cromáticas supone una ventaja para ellos, pues el color es una forma mucho más fiable de identificar los objetos, ya sea a plena luz del día o en la penumbra y la oscuridad, que otros indicadores no cromáticos, como la intensidad. Facilita la búsqueda de alimento, de hogar o de pareja en la oscuridad. «Es sorprendente que tantos animales sean activos por la noche y lleven a cabo tareas que nos están vedadas», afirma Almut Kelber, biólogo de Lund especializado en los sentidos.

Los secretos de la navegación nocturna residen en algún lugar entre el ojo y el cerebro. Las neuronas que conforman los sistemas visuales de estos animales acumulan las briznas de luz y crean con ellas imágenes más brillantes, al tiempo que descartan con cuidado las señales interferentes que las emborronarían. Llevan a cabo esa tarea agregando las señales procedentes de puntos contiguos de su campo visual. Además, también acumulan las procedentes de puntos aislados durante un período prolongado, básicamente ralentizando la percepción visual, todo con el fin de realzar la claridad de los objetos.

EN COLORES VIVOS

El ojo humano, como el de la gran mayoría de los vertebrados y los invertebrados, alberga células fotorreceptoras que detectan la luz proveniente del exterior. Dichas células son los bastones y los conos. A plena luz, operan principalmente los conos, que transmiten señales al cerebro cuando inciden en ellos fotones de luz roja, verde o azul. Nos otorgan una excelente visión cromática, pero son poco sensibles en la oscuridad. Cuando el sol se pone confiamos en los bastones, más sensibles en virtud de su capacidad para operar en grupo y reunir la información de la escasa luz incidente. El inconveniente radica en que solo pueden distinguir tonalidades de gris.

Warrant, Kelber y otra colega de Lund, Anna Balkenius, fueron los primeros en demostrar la existencia de la visión cromática nocturna en un animal. Introdujeron polillas esfinge (*Sphingidae*) en una jaula del laboratorio y las adiestraron para que relacionaran una flor artificial de color azul o amarillo con una recompensa de agua azucarada. Los zoólogos iniciaron el experimento con una iluminación crepuscular, que aminoraron progresivamente hasta niveles tan tenues como la luz que proyectan las estrellas. A pesar de la creciente oscuridad ambiental, las polillas siguieron diferenciando el amarillo del azul. Desde entonces, el equipo de Kelber ha descubierto esa visión cromática nocturna en abejorros carpinteros (*Xylocopinae*) y en salamanquesas. Ahora pretenden buscarla en murciélagos frugívoros y en búhos y lechuzas, cuyas dotes para la caza nocturna han sido atribuidas a su oído aguzado o a sus grandes globos oculares.

Las ranas también ven colores en la oscuridad: distinguen el azul y el verde. El fisiólogo animal de la Universidad de Helsinki Kristian Donner y sus colaboradores han investigado la fototaxia en la rana bermeja (*Rana temporaria*), esto es, su inclinación a saltar en dirección hacia la luz. El experto se preguntaba si sería muy selectiva en cuanto al color de esa luz. En ensayos de laboratorio realizados décadas atrás con bastones de la rana se había comprobado que algunas de estas células reaccionaban de manera específica a la luz azul, en tanto que otras respondían al verde. Para averiguar de qué modo las diferencias celulares determinaban el comportamiento de este batracio, el grupo de

EN SÍNTESIS

Diversos animales muestran una visión excelente en condiciones crepusculares o nocturnas. Antes se pensaba que recurrían a otros sentidos para encontrar alimento o pareja.

Entre tales facultades se halla la visión cromática. Algunas polillas, ranas y salamanquesas perciben colores en la oscuridad para vagar por el mundo.

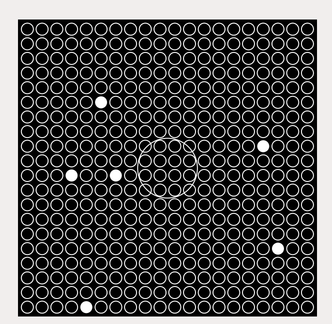
Logran esa proeza gracias a las neuronas de su sistema óptico, que realzan las escasas señales lumínicas procedentes de los ojos.

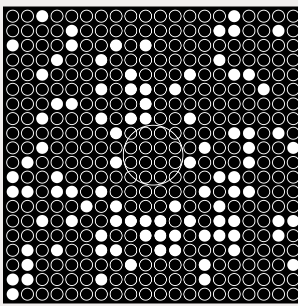
PÁGINAS ANTERIORES: HÅKAN LILJENBERG, ALAMY

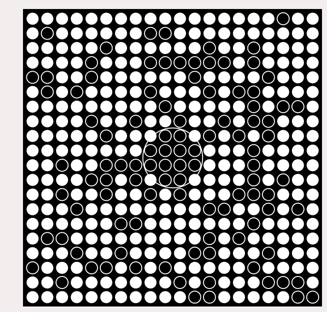
MECANISMO DE VISIÓN

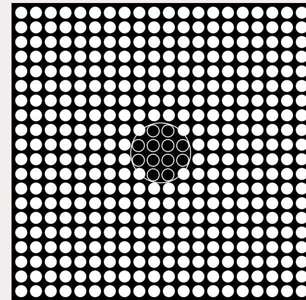
Discernir una forma en la noche

En la oscuridad, las células del ojo que detectan la luz tienen pocas posibilidades de atrapar los pocos fotones (unidades de luz) que pueden revelar un objeto. Este diagrama muestra 400 células fotorreceptoras que intentan discernir un círculo. Con solo seis fotones incidentes (*izquierda*) resulta imposible distinguir el círculo del fondo oscuro. Pero a medida que estos aumentan en número, también lo hace el contraste entre el círculo y el entorno. Ahora bien, el objeto se hace patente solo cuando los niveles se potencian 1000 veces (*derecha*).









DE: «THE REMARKABLE VISUAL CAPACITIES OF NOCTURNAL INSECTS: VISION AT THE LIMITS WITH SMALL EYES AND TINY BRAINS», ERIC J. WARRANT, EN *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B*, VOL. 372, 5 DE ABRIL DE 2017

Donner depositó 17 ejemplares, de uno en uno, en una cubeta provista de dos ventanillas en lados opuestos. A continuación, proyectaron luz azul en un extremo y verde en el otro, y luego midieron la frecuencia y la dirección de sus saltos con distintas intensidades lumínicas.

Si la cubeta permanecía a oscuras por completo, los saltos eran al azar. Pero en cuanto proyectaban la mínima cantidad de luz posible, mostraban una preferencia clara por el verde. «En el límite mismo de la visión, seguían diferenciando el azul y el verde», explica Donner. A efectos comparativos, sus estudiantes, que metieron la cabeza en la cubeta, no pudieron percibir el menor atisbo de luz, mucho menos precisar si era verde o azul.

No se sabe con certeza por qué estos anfibios saltan hacia la luz verde. Tal vez, especula Donner, obtengan pistas de las estrellas. La luz estelar está formada por longitudes de onda relativamente largas y las propias de la luz verde lo son más que las de la luz azul, así que el verde que incidía sobre la cubeta señalaría hacia los espacios abiertos bajo el firmamento nocturno y, en definitiva, una vía de escape del recipiente.

SENDEROS DE LUZ SIDERAL

Si de verdad las ranas se guían por el firmamento nocturno, podemos pensar que no serán las únicas. Los escarabajos peloteros se desplazan en una línea perfectamente recta en las noches de luna nueva, cuando la única luz celeste procede de las estrellas. El movimiento es una buena estrategia para un escarabajo que tiene entre manos un bonito pedazo de estiércol fresco, explica James Foster, biólogo de Lund especializado en los sentidos. Quiere alejarse de los demás escarabajos que se amontonan en la boñiga y encontrar un pedazo de tierra desocupado donde enterrar su trofeo. Al marchar en línea recta mientras empuja la pelota, en lugar de zigzaguear o cambiar de dirección, se aleja de la boñiga lo más rápido posible.

¿Cómo lo consigue? La consejera de Foster en Lund, Marie Dacke, Warrant y otros investigadores ya habían descubierto que los insectos se sirven de lo que ven sobre ellos para orientarse. Así que les colocaron encima unas viseras de cartón que les impedían ver el cielo y los dejaron sueltos en una pista circular para observar el camino que seguían hasta su borde. Con la visera, los escarabajos tomaron caminos mucho más tortuosos, lo que indicaba que algún cuerpo celeste era importante para ellos.

Sus sospechas se centran en las estrellas, lo que los convertiría en auténticos marinos de seis patas, guiados por las constelaciones. A fin de poner a prueba su idea, Dacke y sus colaboradores los llevaron, con sus pelotas de estiércol, al único lugar donde es posible modificar el firmamento nocturno a voluntad: un planetario. Ya fuera con la simulación de un cielo sembrado de estrellas o con la sola presencia de la brillante banda de la Vía Láctea, se encaminaron sin titubeos hasta el borde del círculo en menos de un minuto. Tardaron más si la galaxia no estaba presente. Esta constituye la primera demostración de orientación animal gracias a esa banda de estrellas. (A raíz de su publicación en la revista *Current Biology* en 2013, el trabajo ganó un irónico Ig Nobel de biología y astronomía.)

En fecha más reciente, Foster ha investigado de qué modo el escarabajo pelotero usaría la Vía Láctea para tomar un rumbo concreto. Vista desde la Tierra, la densa franja de estrellas traza una línea bastante simétrica, por lo que el insecto debería de verla igual se desplace hacia delante o hacia atrás. A pesar de ello, nunca se da la vuelta. Foster sospechó que el coleóptero percibía las pequeñas diferencias de intensidad lumínica entre ambos extremos de la Vía Láctea. Al analizar fotografías de la galaxia tomadas desde el hábitat de los escarabajos en Sudáfrica, descubrió que la intensidad de la luz que emanaba de sus extremos norte y sur difería por lo menos en un 13 por ciento, a veces mucho más, según el modo en que se procesaran las imágenes.

Para someter a prueba su posible efecto sobre los escarabajos, construyó una versión artificial y simplificada de la Vía Láctea con una simple hilera de luces led en forma de arco sobre una pista circular. Podía variar la intensidad de la luz a cada lado. Los escarabajos marchaban en línea recta si se les proporcionaba un contraste del 13 por ciento entre un extremo y otro del arco luminoso, pero vacilaban si era inferior a ese valor. Eran capaces, pues, de distinguir los dos extremos de la Vía Láctea.

POTENCIACIÓN DE LA SEÑAL

Los escarabajos y las abejas no son los únicos dotados de una visión nocturna notable: las cucarachas, el pez linterna, la sepia,

AGREGACIÓN DE SEÑALES

Mejora de la imagen con baja luminosidad

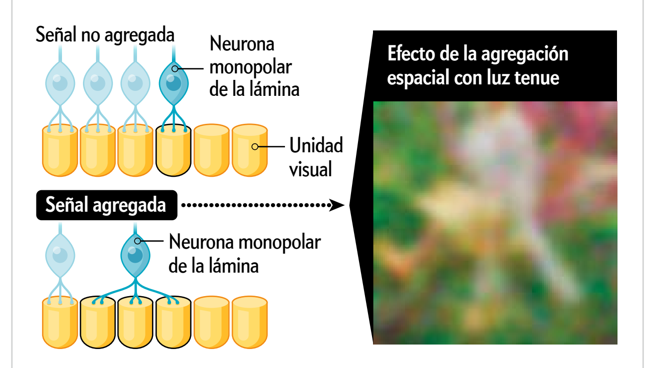
Durante el día, la luz abundante permite una visión aguda. Pero cuando cae la noche, los pocos fotones disponibles raramente estimulan las células fotorreceptoras y solo lo hacen débilmente. El resultado es una imagen vaga, borrosa. Las polillas esfinge resuelven este problema agregando en el espacio y el tiempo esos escasos fotones.





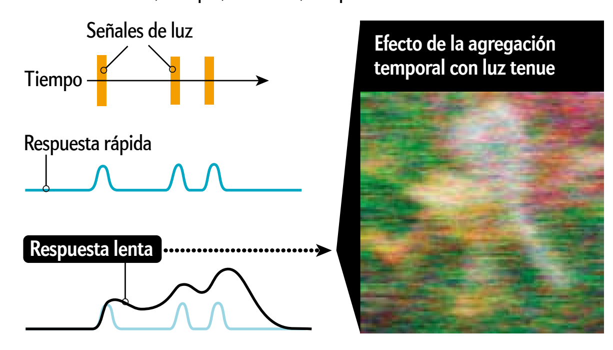
Agregación espacial

En condiciones de penumbra, las escasas señales visuales parten de los fotorreceptores hacia las regiones ópticas del cerebro. Pero en algunos insectos, las neuronas monopolares de la lámina, radicadas en una región intermedia, agrupan las señales procedentes de puntos contiguos del ojo. Crean así una unidad visual más brillante, pero a expensas de la nitidez, pues combinan señales originarias de puntos distintos.



Agregación temporal

Por la noche, los fotorreceptores moderan la velocidad de transmisión de señales hacia el cerebro. Por muy rápidas que sean, resultan demasiado débiles para estimular una respuesta tangible en las regiones visuales del cerebro. Pero al ralentizar la respuesta, las células dejan que las señales se acumulen y generen así un estímulo más potente en su destino. Esto aumenta el brillo, aunque, de nuevo, a expensas de la nitidez.



algunas ranas y ciertos primates, como los micos nocturnos (*Aotus*), también forman parte del elenco. Así que los neurocientíficos están dirigiendo su atención hacia la incógnita de cómo lo consiguen. Los ojos grandes captan más luz, pero no los fotones suficientes para explicar la aguda visión escotópica de la que se tiene constancia. Una vez que los bastones han absorbido la luz incidente, debe de tener lugar otro procesamiento visual. En concreto, los animales deben de abolir o filtrar el «ruido» visual creado por la actividad de los fotorreceptores, que no revela nada útil sobre el mundo visible.

Las interferencias proceden de varias fuentes. Una, el llamado ruido fotónico, aparece cuando el número de fotones que incide sobre los fotorreceptores es muy bajo. Como esos paquetes de luz tienden a llegar esporádicamente, crean una imagen variable, inestable. Es como si disparáramos tres o cuatro destellos de *flash* hacia el techo de la Capilla Sixtina en plena noche: difícilmente apreciaríamos la obra maestra de Miguel Ángel en todo su esplendor.

Una segunda fuente de interferencias surge de las interacciones moleculares en los propios fotorreceptores. Estos detectan la luz cuando un fotón colisiona contra una molécula llamada rodopsina. Pero, de tanto en tanto (una vez cada minuto, a lo sumo), una de esas moléculas se activa por accidente, u otra parte de la ruta falla. A esa actividad espontánea se la llama «ruido oscuro», porque sucede incluso en la oscuridad más absoluta con los párpados cerrados. Una tercera fuente, el ruido derivado del mecanismo de transducción, obedece a la variación en la latencia y la amplitud de la respuesta del sistema visual a un solo fotón real.

El ruido no supone un problema grave a plena luz del día, pues la ingente cantidad de fotones que incide en los ojos compensa sobradamente esas variaciones leves. Pero en la oscuridad, es preciso contar con algún medio para potenciar la señal hasta niveles similares a los diurnos que desborden esas interferencias. Y este consiste en acumular y sumar las señales que reciben de los fotorreceptores en el espacio y en el tiempo.

La acumulación espacial funciona del modo siguiente: imaginemos que asistimos a un concierto donde un millar de personas agita emocionado los brazos alzados con su teléfono móvil encendido. Nos resultará difícil ver la luz de cada teléfono. Pero si grupos de 50 asistentes enfocasen la luz del teléfono hacia un único punto brillante, sí veríamos bastante bien los 20 puntos resultantes. La retina, la lámina de tejido ocular que alberga los bastones y los conos, hace lo mismo: agrupa las señales transmitidas por un nutrido número de bastones en una única señal más grande que transmite al cerebro. En el concierto, perderíamos la imagen de cada persona agitando el teléfono. Y lo mismo sucede en la acumulación espacial; la imagen resultante es más brillante pero también más borrosa.

La acumulación temporal aumenta igualmente el brillo. Los bastones enlentecen su actividad, acumulando las señales de los fotones entrantes durante, digamos, 100 milisegundos. De nuevo, hay una contrapartida. Este tipo de acumulación facilita la percepción de los objetos, pero emborrona el movimiento.

Algunos insectos simultanean la acumulación espacial y la temporal en un proceso que tiene lugar en neuronas más internas, situadas cerca del cerebro, según la bióloga Anna Stöckl, ahora en la Universidad de Wurzburgo. Cuando trabajaba con Warrant, colocó polillas delante de una pantalla

DE «NEURAL SUMMATION IN THE HAWKMOTH VISUAL SYSTEM EXTENDS THE LIMITS OF VISION IN DIM LIGHT», ANNA LISA STÖCKL ET AL., EN *CURRENT BIOLOGY*, VOL. 26, N.º 6; 21 DE MARZO DE 2016 (*fotografías de flores*); TAMI TOLPA (*gráficos*)

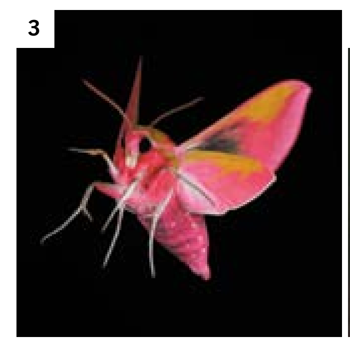
1



2



3



4



EN LA OSCURIDAD, las abejas halíctidas perciben formas detalladas (*1*), el escarabajo pelotero se orienta con la luz del firmamento (*2*), las polillas esfinge combinan las señales visuales para conferir claridad a las imágenes (*3*), y el macaco cola de cerdo (*Macaca nemestrina*) filtra las interferencias de lo que ve (*4*).

ALAMY (*abeja*); CHRIS COLLINGRIDGE (*escarabajo*); MALCOLM SCHUYL, ALAMY (*polilla*); ANUP SHAH, GETTY IMAGES (*macaco*)

de ordenador en la que aparecía un dibujo de bandas blancas y negras en movimiento. Después practicó un minúsculo orificio en la parte posterior de su cabeza e introdujo unos electrodos en las neuronas. Quería estimular los fotorreceptores con cada banda alterna y comparar su actividad con la de otras neuronas de una región más interna del cerebro, el lóbulo óptico. Este recibe la señal una vez que ha sido elaborada o sometida a un proceso de acumulación, por lo que las diferencias entre las señales «entrantes» sin procesar en el fotorreceptor y las señales «salientes» en el lóbulo indicarían que el cerebro modificaba los estímulos visuales.

Comparando esos valores de entrada y salida, Stöckl calculó que, cuando trasladaba las polillas de la luz a la oscuridad, el tamaño de un «píxel» en su lóbulo óptico se cuadruplicaba, lo cual demostraba que empleaban la acumulación espacial. También descubrió que utilizaban la acumulación temporal, esto es, que frenan su visión en la oscuridad de modo que acumulan señales durante 220 milisegundos. La combinación de ambas permite a las polillas ver bien con intensidades de luz cien veces menores que cuando no emplean la acumulación, relató Stöckl en un artículo en 2016.

«Esta facultad no ha sido descrita en ningún otro animal, aparte de las esfinges, pero el principio es tan básico que resulta difícil creer que no esté más extendido», afirma Warrant.

Otra estrategia del mundo animal consiste en filtrar el ruido, afirman los que han investigado los métodos de eliminación del ruido visual en ratones y monos. No están a la altura de las polillas, pero estos mamíferos se las apañan bastante bien en la oscuridad nocturna. Se ha comprobado que en el trayecto que separa los fotorreceptores del cerebro existen al menos dos umbrales que solo dejan pasar las señales potentes y rechazan las que parecen ser interferencias. A mitad de trayecto, las neuronas bipolares que permanecen enlazadas con los bastones conforman la primera barrera. Estas solo retransmiten la señal de «fotón detectado» si la señal que reciben de los bastones es lo bastante potente. La llegada simultánea de varios fotones lo es; los fotones solitarios y buena parte del ruido infiltrado en el sistema no. La segunda barrera celular radica en un punto posterior del sistema óptico, situado en el mismo trayecto. Esta bloquea las señales errantes que escapan al primero o que surgen después de ese punto. El resultado es una visión prácticamente exenta de interferencias, afirma Petri Ala-Laurila de la Universidad de Helsinki, uno de los descubridores del proceso.

VISIÓN DE FUTURO

A pesar de todas las investigaciones, Warrant afirma que apenas se comienza a conocer la visión escotópica de los animales y los mecanismos que se ocultan tras ella. El estudio de los genes y las moléculas fotosensibles propias de la fauna nocturna brinda pistas nuevas. Algunos lémures de hábitos nocturnos poseen genes y pigmentos que indican que sus ojos pueden ser sensibles al azul o el verde, lo que les ayudaría a reconocer semillas azuladas y hojas verdes en condiciones de baja luminosidad. Y algunos murciélagos —que, en contra de lo que muchos creen, no son ciegos— también tienen genes vinculados a la visión cromática.

Aun así, ser poseedor de genes y moléculas que capten el color no demuestra que el cerebro del animal haga uso de esa información durante la noche. Por ejemplo, algunas moléculas fotosensibles intervienen en el mantenimiento de ritmos corporales que no guardan relación alguna con la visión. Se necesitan, pues, experimentos etológicos, como los realizados con las polillas y las ranas, para averiguar qué moléculas intervienen en la visión nocturna. Ese trabajo podría revelar que las moléculas no se emplean en la oscuridad o dar a conocer trucos destinados a tal fin que ni siquiera hemos imaginado.

PARA SABER MÁS

Nocturnal colour vision–not as rare as we might think. Almut Kelber y Lina S. V. Roth en *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, n.º 5, págs. 781-788, 1 de marzo de 2006.

Vision in dim light. Eric Warrant en *Visual Ecology.* Thomas W. Cronin, Sönke Johnsen, N. Justin Marshall y Eric J. Warrant. Princeton University Press, 2014.

Vision in dim light. Recopilado y editado por David O'Carroll y Eric Warrant. Número temático de *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 372, 5 de abril de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las cucarachas ven en la oscuridad. Rachel Nuwer en *IyC*, marzo de 2015.

Comunicación visual en la penumbra. María del Mar Delgado y Vincenzo Penteriani en *IyC*, junio de 2018.

por Sergio Quintana, Alba Zamora, Lucas González y Moya Mae Walton

Sergio Quintana es profesor de física y química, y jefe del Departamento de Ciencias Naturales en el Instituto de Educación Secundaria Sulayr en Pitres (Granada). **Alba Zamora, Lucas González** y **Moya Mae Walton** son alumnos de primero de bachillerato y ganadores de la última edición del concurso «Cristalización en la Escuela» de Andalucía.

El efecto ajolote

Un experimento escolar ha llevado a descubrir un curioso fenómeno de regeneración cristalina

Es fácil quedarse por un instante absorto frente a un vaso de refresco con hielo, sobre todo si el calor acompaña. Lo que no es tan común es darse cuenta de que, en ese vaso que sostenemos en la mano, posiblemente el único cristal que podemos ver es el que se funde poco a poco para enfriar la bebida que nos reconforta a cada trago. El hielo sí es un cristal. El pobre vidrio, en cambio, pertenece a los llamados sólidos amorfos. En palabras del experto en materiales Christopher Patrick (Paddy) Royall, de la Universidad de Bristol, el vidrio quiere ser cristal... pero está «frustrado». A pesar de su indudable interés, dejaremos el vidrio para otro momento y nos centramos aquí en el que ha sido nuestro trabajo: el estudio del crecimiento cristalino mediante distintos métodos y sustancias.

Los experimentos que describiremos a continuación han estado motivados por la participación de nuestro centro, el instituto de secundaria Sulayr, en la Alpujarra granadina, en la última edición del concurso «Cristalización en la Escuela» de Andalucía. Este certamen, cuyo objetivo es incentivar el espíritu investigador de los estudiantes, nació en 2009 y está organizado por el Laboratorio de Estudios Cristalográficos del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-Universidad de Granada) y la Fundación Descubre, con la colaboración de varias universidades españolas. La experiencia ha sido muy enriquecedora: hemos aprendido a trabajar como auténticos investigadores (incluso hemos presentado los resultados en una sesión de pósters), hemos descubierto un

TODAS LAS IMÁGENES SON CORTESÍA DE LOS AUTORES



ESTE ESPECTACULAR CRISTAL de fosfato monoamónico se ha obtenido mediante un fino control del crecimiento cristalino, en el que se ha favorecido la regeneración de determinadas partes.

curioso fenómeno de regeneración cristalina y, además, ¡hemos ganado el concurso! Os invitamos a compartir con nosotros esta aventura científica por el asombroso mundo de los cristales.

Recordemos que un cristal es un material formado por repeticiones de una celda unidad con forma de paralelepípedo a escala molecular, que dan lugar a una estructura tridimensional llamada red cristalina. Como decíamos, nuestro propósito era estudiar cómo afectaban al crecimiento de esa red la aplicación de distintos métodos (sobre todo la evaporación del disolvente) y sustancias.

Para nuestros experimentos utilizamos como material de partida fosfato monoamónico (ADP, por sus siglas en inglés) del que se emplea a modo de abono. Esta sustancia cristaliza en el sistema tetraédrico, lo que significa que las tres aristas que confluyen en cualquier vértice de la celda unidad forman ángulos de 90 grados y que dos de ellas tienen la misma longitud. La forma resultante equivaldría a una columna de base cuadrada. A partir de esta estructura básica, las variaciones en las condiciones de crecimiento dan lugar a cristales de ADP que adoptan dos formas, o hábitos cristalinos: bipiramidal (dos pirámides unidas por la base) y prismático (dos pirámides unidas por una columna). La solubilidad del fosfato monoamónico en agua es elevada y varía mucho con la temperatura. Ello facilita la observación de varios fenómenos.

Comenzaremos con la cristalización por enfriamiento. Este método se basa en disminuir la temperatura de una disolución con el propósito de reducir la solubilidad del soluto y con ello forzar su cristalización. (Es uno de los métodos más fáciles de llevar a cabo debido a la relativa rapidez de la cristalización.) La organización del concurso nos facilitó unos recipientes de poliestireno de forma casi cilíndrica, cuyo interior albergaba un vaso grande de plástico, exactamente del mismo tipo del que utilizan muchas heladerías para envasar el helado que nos llevamos a casa. Según las bases del certamen, la forma de iniciarse en la cristalización es tan sencilla como disolver en un vaso de precipitados unos 300 gramos de ADP en medio litro de agua sobre un calentador. Si es necesario, dejamos reposar la disolución unos minutos para poder verterla a menos de 80 °C en el vaso de plástico sin dañarlo. El vaso debe estar en el recipiente de poliestireno y ambos se tapan para lograr un enfriamiento más pausado y uniforme.

En el interior del recipiente se irá produciendo la magia de la cristalización. Comienza con la composición de las nucleaciones primarias, pequeños agregados espontáneos del material que queremos cristalizar, muchas veces en torno a impurezas o sobre irregularidades del recipiente. Alrededor de estos núcleos va creciendo el cristal en un proceso estocástico que hace que siempre sea una sorpresa abrir el recipiente tras unos dos días de espera. Conforme la sobresaturación disminuye, también lo hacen las ramificaciones y nucleaciones secundarias, que son las que surgen en torno a cristales ya presentes. Una reducción gradual de la temperatura provocará, por tanto, una inclusión ordenada en la red tridimensional cristalina de los iones que exceden la capacidad de la sustancia para disolverse. Debido al carácter probabilístico del proceso, obtendremos como resultado cristales más perfectos y hermosos... o no.

Haciendo uso de este método podemos experimentar con varios colorantes y estudiar su grado de inclusión en la red cristalina. Nosotros utilizamos distintas sustancias, algunas de uso culinario. La cúrcuma no produjo ningún resultado notable en concentraciones de hasta 10 gramos por litro (g/l). En cambio, los colorantes genéricos alimentarios azul y amarillo (el primero a base de erioglaucina o aditivo E 133; el segundo, con luteína y curcumina) se incluyeron bien en el cristal; según su concentración, variaban la tonalidad y la intensidad del color. En el caso del colorante amarillo, dada la hidrofobicidad y tamaño de sus moléculas, sospechamos que su aportación de color se debe a inclusiones en las irregularidades del cristal, más que en la red cristalina en sí.

Algo más interesante ocurrió con otro colorante culinario. Ya habíamos tenido experiencia con él en otras ediciones del concurso —de forma accidental, por cierto, como en numerosos hallazgos científicos—. Fue durante un experimento en el que se pretendía aumentar la viscosidad del medio de cristalización para disminuir la difusión del material, con el propósito de reducir la velocidad de crecimiento y, por ende, mejorar la calidad del cristal. En esa ocasión, alguien confundió un espesante de cocina con un endulzante a base de fructosa. El resultado fue más que curioso. La mezcla inicial de reactivos era bastante transparente y ligeramente blanquecina. Sin embargo, al abrir el recipiente descubrimos que el sobrenadante y los cristales presentaban una tinción oscura. Y algo todavía más llamativo: ¡desprendían un agradable olor a caramelo! Seguimos esta vía y obtuvimos resultados parecidos con D-glucosa y sacarosa (azúcar común), ambos a partir de 30 g/l, e incluso con caramelo producido in situ tostando sacarosa en un cazo.

A partir de nuestros análisis y la bibliografía consultada, dedujimos que, si bien los fenómenos de caramelización y las reacciones de Maillard se favorecían con temperaturas elevadas (superiores a los 100 °C), estas no se alcanzaban con las técnicas que habíamos aplicado. ¿Qué había ocurrido entonces? La respuesta se hallaba en la catálisis ácida y la presencia de iones amonio, ambos conocidos factores iniciadores de la caramelización, y ambos facilitados por la presencia del ADP en el medio de disolución.

En cuanto a los colorantes no alimentarios, optamos por tres de los más potentes: azul de metileno (1 g/l), tricloruro de hierro hexahidratado ($FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$; 20 g/l) y permanganato potásico ($KMnO_4$; 0,6 g/l). En el primer caso, no obtuvimos nada destacable. En el segundo, se formó en el fondo del recipiente un lodo blanquecino. Pensando en las posibles combinaciones de iones que pudieran derivar en tal resultado, vimos que la interacción de los fosfatos con los iones hierro (III) resultaría en fosfato de hierro ($FePO_4$). Buscamos su producto de solubilidad y hallamos un valor reducido, del orden de 10^{-15}. Ello significaba que este compuesto era lo bastante insoluble como para



❶ Cristal de ADP con capa final de ADP y caramelo.



❷ Cristal de ADP con EDTA y estructuras dendríticas tintadas por sulfato de cobre.



❸ Cristales de ADP y permanganato con crecimiento secundario en ADP con EDTA.

corresponder al sedimento que habíamos encontrado en el recipiente.

El tercer colorante no alimentario, el $KMnO_4$, nos abrió un nuevo frente de posibilidades. Este reactivo originaba una tinción muy homogénea en tonos rojizos, y no morados, como correspondería a su típica dilución acuosa. Además, los cristales eran más frágiles que los anteriores. Parecía que se estaba produciendo alguna interferencia en la red cristalina, como si los iones permanganato lograsen trastornar la alternada sucesión de iones amonio y fosfato en el ADP.

En ese punto, y buscando unos cristales todavía más puros y vistosos, decidimos pasar a otro método: el crecimiento cristalino por evaporación del disolvente. Necesitábamos, por tanto, una disolución saturada de ADP en la que sumergir las semillas cristalinas. Para saber la concentración que debíamos preparar, consultamos la curva de solubilidad del ADP. A unos 16 °C (la temperatura del laboratorio en aquellas mañanas de primavera), la solubilidad es de 34,2 g por cada 100 ml de agua.

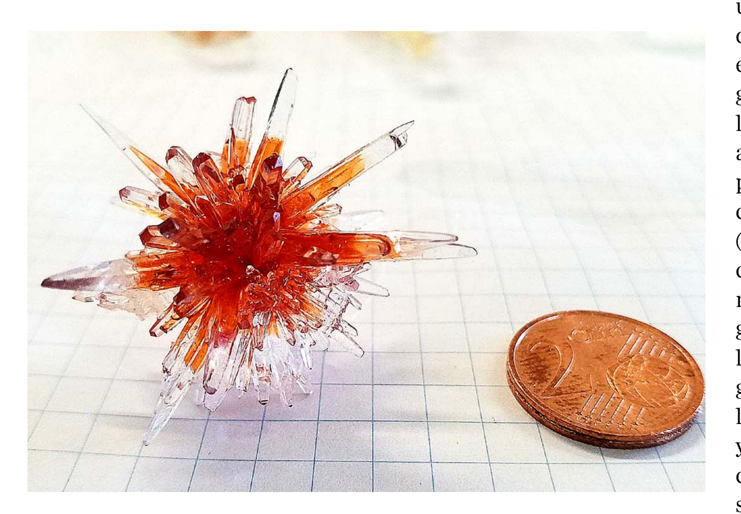
Para facilitar el proceso, decidimos empezar con diluciones de 200 g de ADP en 500 ml de agua a unos 80 °C. Filtramos la primera disolución y la dejamos reposar. Al día siguiente, la encontramos transparente y homogénea, así que, con cierto miedo de que un fallo en las medidas hubiera derivado en una solución diluida —esperábamos que el exceso de soluto habría precipitado—, la vertimos en cubetas para empezar a darle uso.

De nuevo, otra sorpresa para cristalizadores novatos: en pocos segundos, toda la superficie del recipiente se vio recubierta de pequeños cristales que crecían ante nuestros ojos y se fusionaban entre ellos para formar un revestimiento transparente irregular. El fenómeno recuerda al de la bebida dejada en un congelador un poco más de tiempo del debido y que podemos sacar todavía líquida, hasta que un pequeño golpe inicia un rápido proceso de formación de hielo. Habíamos preparado una disolución metaestable, en nuestro caso levemente sobresaturada, no lo suficiente como para que cristalizase espontáneamente, pero sí al introducir una perturbación.

Volvimos a filtrar la disolución, la vertimos en pequeños contenedores de plástico y colocamos en el fondo fragmentos de cristales de experiencias anteriores. Solo restaba esperar a que el agua se fuera evaporando. Al variar la evaporación con la humedad ambiental y la temperatura, el crecimiento por este método depende intrínsecamente de ambos factores. Así aprendimos que los días de lluvia son buenos para muchas cosas, pero no para los ensayos por evaporación.

Las ventajas que ofrece esta técnica se basan en la difusión lenta del ADP desde la zona de evaporación al resto de la solución. Ello se refleja en un crecimiento cristalino más perfecto, mejores facetas, mayor transparencia y menor inclusión de colorantes al estar la red cristalina mejor organizada. De los colorantes antes citados ya solo seguían siendo útiles el $KMnO_4$ y, curiosamente, el caramelo en cualquiera de las variedades estudiadas ❶.

El último, pero no menos útil, aditivo utilizado fue el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en una concentración de 0,8 g/l de disolución de ADP. Ya lo habíamos empleado otros años para eliminar las impurezas iónicas, es decir, como sustancia quelante (recibe este nombre porque captura las impurezas del mismo modo en que el cangrejo atrapa a sus presas con las «pinzas», *chelé* en griego). Queríamos así reducir los núcleos de cristalización y tener menos y mayores cristales. Los curiosos resultados fueron, además de una menor nucleación, una



❹ Estrella de ADP y permanganato con puntas regeneradas en ADP.

mayor transparencia, menor fragilidad y un notorio cambio del hábito bipiramidal (al que estábamos acostumbrados) al prismático.

De nuevo, gracias a la bibliografía consultada y a nuestra experiencia, aprendimos que el EDTA, sin incluirse en la red cristalina, disminuye no solo las nucleaciones primarias, sino también la velocidad de crecimiento de las caras del cristal 010 y 100 respecto a las 011 y 101 [*véase el esquema de la derecha*]; curiosamente, ello hace más visibles las primeras y, como resultado, potencia el hábito prismático.

Asimismo, la evaporación del disolvente permite obtener con cierta facilidad monocristales o cristales únicos, mediante el crecimiento de semillas cristalinas no ramificadas. Estos se pueden hacer crecer sucesivamente en distintos medios, usando $KMnO_4$, caramelo u otras sustancias, y observar los efectos de cada medio en la coloración y el crecimiento de nuestro cristal ❷.

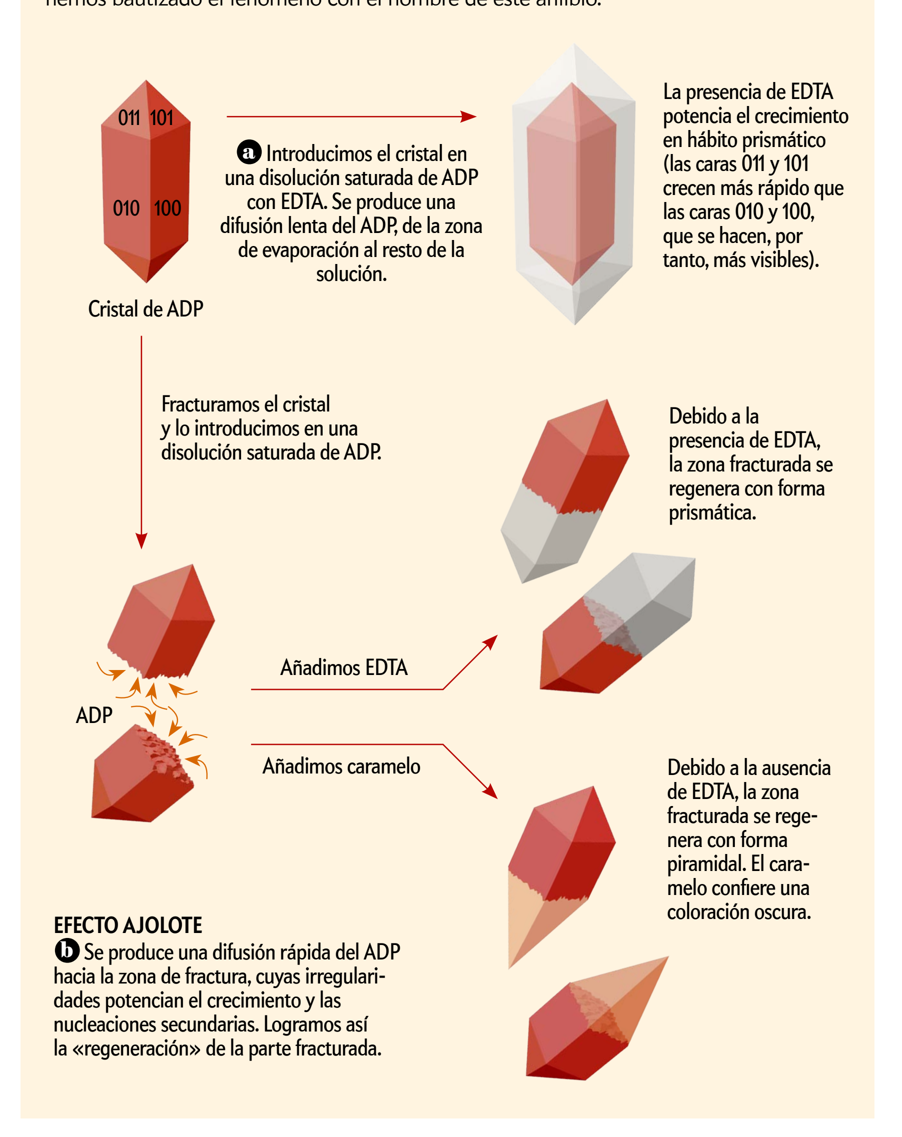
Otra experiencia sugerente se realiza alternando disoluciones con o sin EDTA para observar el cambio de hábito cristalino en un mismo monocristal. Para ello se puede partir de una disolución saturada de ADP con $KMnO_4$ y sin EDTA (el EDTA retira el $KMnO_4$ de la disolución), en la que se deja crecer por evaporación una pequeña semilla de ADP. Crecerá un cristal rojo con hábito bipiramidal. Se puede entonces sumergir en otra disolución saturada de ADP con EDTA y veremos cómo crece una capa transparente de cristal que va tomando forma de prisma, en cuyo interior se observa aún el cristal coloreado anterior ❸.

El último fenómeno que observamos a lo largo de nuestra experiencia, quizás el más interesante y que dio nombre a nuestro trabajo, es el «efecto ajolote». Lo bautizamos así en honor de un anfibio mexicano que muestra una extraordinaria capacidad de regeneración —luego supimos que un pariente cercano suyo, el gallipato, mora en los jardines de nuestra amada Alhambra—. El efecto consiste en la aparente y vistosa regeneración, gracias al uso de los colorantes, de las secciones fracturadas de un cristal en crecimiento por evaporación del disolvente.

Comprobamos que, al partir un cristal, en la zona quebrada se crea una superficie adicional irregular que multiplica la posibilidad de crecimiento y de nucleaciones secundarias. El mayor crecimiento en la zona disminuye la concentración local de ADP, lo que aumenta la difusión por gradiente de concentración. Se ralentiza así el crecimiento en otras zonas del cristal en favor de la regeneración de la parte perdida, favorecido, además, por la tendencia de crecimiento apical del ADP. Lo mismo hace el ajolote (o gallipato), cuando emplea sus recursos para regenerar un miembro perdido. Además, en el caso de los cristales, se puede controlar tal regeneración cambiando las condiciones de crecimiento para hacerla más notoria ❹.

REGENERACIÓN CRISTALINA

EL CRECIMIENTO CRISTALINO por evaporación del disolvente nos permite obtener cristales puros y perfectos debido a que el soluto (ADP en nuestros experimentos) se difunde lentamente y de forma homogénea ⓐ. Sin embargo, hemos descubierto una forma de alterar esa regularidad y favorecer el crecimiento en una zona determinada del cristal: rompiéndolo. Allí donde se produce una fractura, aumentan las irregularidades y, por tanto, la superficie; ello potencia el crecimiento en la zona fracturada y lo ralentiza en el resto del cristal, lo que da lugar a la «regeneración» de la parte perdida ⓑ. Por analogía con la capacidad de regeneración de las extremidades que presenta el ajolote, hemos bautizado el fenómeno con el nombre de este anfibio.



EN NUESTRO ARCHIVO

Materia cristalina. Marc Boada Ferrer en *IyC*, mayo de 2014.

La belleza cristalina de los copos de nieve. H. Joachim Schlichting en *IyC*, febrero de 2017.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Linneo y Mutis

Unidos por la naturaleza

José Manuel Sánchez Ron

Carl Linnaeus (1707-1778), conocido después de haber sido ennoblecido como Carl von Linné (castellanizado Carlos Linneo) es uno de los grandes nombres de la historia de las ciencias naturales, uno que difícilmente será olvidado. Estudió en la Universidad de Uppsala, en la que comenzó a dar clases de botánica en 1730. Sin embargo, abandonó su patria y vivió en el extranjero entre 1735 y 1738, año en que regresó a Suecia en calidad de catedrático de medicina en su *alma mater*, en la que desarrolló el resto de su carrera. De hecho, su primer gran libro, *Systema naturae per regna tria naturae, secundum clases, ordines, genera, speciescum characteribis, diferentiis, synonymis, locis* (1735), lo publicó en Holanda. En él estableció los principios que habrían de regir el sistema taxonómico de clasificación de especies.

En las plantas, su verdadera especialidad, el método consistía en contar el número de estambres (órganos masculinos) para determinar la clase, y luego contar el número de pistilos (órganos femeninos) para determinar el orden. Era sencillo, al alcance de cualquiera. Solo había que contar. A continuación creó un sistema para nombrar las especies, que presentó en otro libro, *Species plantarum* (1753): la denominada nomenclatura binomial, formada por dos nombres, el género y la especie.

El género expresa la pertenencia a un grupo de plantas o de animales, mientras que la especie distingue a los del mismo género y puede venir definida por epítetos que se refieren a muy diversas cosas: origen geográfico, características cromáticas, estructura del organismo, una persona, etcétera. Por ejemplo, *Solanum* es el término latino (el latín era el idioma que utilizaba, y exigía, Linneo) para un género (formado por unas 1400 especies) que incluía árboles, arbustos y herbáceas; la patata, que pertenece a este género, se denomina *Solanum tuberosum* («que produce tubérculos subterráneos»), y el tomate es *Solanum lycopersicum* («melocotón de lobo»).

Para llevar a cabo su programa, cuyo alcance era inmenso, pues se trataba de nombrar y clasificar a todos los organismos vivos presentes en la naturaleza, Linneo necesitaba ayuda de otros. Por ello recurrió a discípulos —como Pehr Löfling (1729-1756), al que envió a España y América, donde falleció (en Venezuela) a la temprana edad de 27 años— al igual que corresponsales extranjeros. Uno de estos fue el gaditano José Celestino Mutis (1732-1808), seguramente el mayor naturalista que haya nacido jamás en España (entre sus muchas aportaciones figura la de haber organizado y dirigido una gran Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada). Después de ejercer como médico en España, Mutis se trasladó a América, al Nuevo Reino de Granada, en 1760 como médico de Pedro Messía de la Cerda, que acababa de ser nombrado virrey de allí. En una carta que escribió desde Cartagena de Indias en mayo de 1763 a un corresponsal desconocido, explicaba algunos pormenores del traslado:

Desde que salí de Madrid me he entregado enteramente a un estudio serio de la historia natural, para cumplir con las miras que me propuse cuando tomé la resolución de pasar al Nuevo Mundo, con una suerte tan oportuna como la honrosa compañía de un virrey. Sin embargo, no he abandonado dichos estudios, en cuyos ejercicios me entretiene la obligación de mi facultad, y otro nuevo destino. Lo cierto es que, deseando juntar materiales para la relación completa de mi viaje, no me acomodo a dispensarme de todas aquellas cosas que pueden contribuir a ilustrar mis observaciones, especialmente en ciencias naturales; embebido en estas ideas he ido aumentando mi afición a estos estudios y puliendo aquellos rudos conocimientos que adquirí en España. En mi peregrinación desde Madrid a Cádiz recogí varias semillas, que remití a Suecia. Esta colección de semillas, que no pude hacer sin grandes trabajos, me facilitó la honrosa correspondencia del señor Linneo. Yo estaba en Santafé [la actual Bogotá], ciudad de mi destino, y corte de los Virreyes del nuevo reino, cuando inesperadamente me hallé con una carta de aquel grande naturalista solicitando eficazmente mi correspondencia y franqueándome el título de miembro de la



REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA

JOSÉ CELESTINO MUTIS observando un ejemplar de *Mutisia*, la especie que le dedicó Linneo hijo. Retrato realizado en 1882 por Cipriana Álvarez de Durán de Machado. El cuadro se halla en la Real Academia Nacional de Medicina.

Academia de Upsal [Uppsala]; vea vuesamerced las primicias de mi trabajoso viaje.

La relación epistolar con Linneo tuvo un intermediario, Clas Alströmer, discípulo de Linneo que se encontraba viajando por España, al que Mutis conoció en Cádiz en agosto de 1760. Muy poco después, el 6 de septiembre, Alströmer escribía a Linneo desde Sevilla informándole de que había conocido a Mutis, un médico muy interesado en la botánica que se dirigía a América, portando en su equipaje algunas obras de aquel. Entre ellas citaba *Philosophia botanica* y *Systema naturae*, que le había proporcionado otro discípulo de Linneo en Cádiz, Fréréric Logié (Mutis reciprocó regalándole algunas plantas y semillas que había recogido en su viaje de Cádiz a Madrid, para que se las enviara a Linneo). «Nada animaría más a este señor Mutis», aconsejaba Alströmer en su carta al maestro de Uppsala, «que un recordatorio con algún consejo escrito de puño y letra por el señor Arquiatra [título que el rey de Suecia confirió a Linneo]. A cambio, él informaría al señor Arquiatra de sus investigaciones y le haría llegar algunas colecciones.»

Se sabe que Linneo escribió inmediatamente a Mutis en febrero de 1761, pidiéndole que fuese su corresponsal en Nueva Granada y que explorase el territorio colombiano, prometiéndole además que le nombraría miembro de la Academia de Ciencias de Uppsala. Sin embargo, los intercambios epistolares entre ambos, tan alejados geográficamente el uno del otro, resultaron muy difíciles, con constantes pérdidas de cartas. En este sentido, el 6 de octubre de 1763 Mutis se dirigía a Linneo desde Santafé de Bogotá (se comunicaban en latín):

He meditado muchas veces qué puede, tan inesperadamente, haberme privado de su correspondencia, lo que puedo atribuir a inconstancia o negligencia de mi parte. Estoy absolutamente seguro de no haber procurado lo más mínimo para privarme de sus cartas. Me aventuro, pues, a molestarlo con otra breve carta para expresarle mis ansiosas esperanzas de que mis anteriores hayan llegado a sus manos, y mis temores de que vmd. no conozca aún en cuánto aprecio su buena opinión [...]

He pedido últimamente a Mr. Bellmann [Pellman], cónsul sueco en Cádiz, el favor de saludarle en mi nombre a fin de que no crea que lo he olvidado. Ahora seguro de conservar su amistad, pienso remitirle, muy pronto, copias de cuatro cartas que en varias ocasiones le he escrito.

Pero seguían sin llegarle cartas de Linneo, y el 24 de septiembre de 1764 Mutis volvía a la carga, refiriéndose a «aquella carta suya, tan llena de bondades, que recibí cuando estaba pensando en entablar correspondencia con vuesamerced» y lamentándose de seguir sin noticias suyas. Señalaba, asimismo:

Recuerdo haberle escrito por segunda vez, en marzo de 1762, comunicándole algunas de mis observaciones sobre las hormigas americanas. Le mencionaba en esta carta mi ansiedad por conseguir la segunda edición de su Fauna suécica, *de la que estuve muy necesitado. En el transcurso de julio, del mismo año, escribí a vuesamerced de nuevo, por la vía de Caracas [...] Le adjunté algunas descripciones de plantas, con un informe de mi reciente viaje a Cartagena, en compañía del virrey.*

Continuaba más adelante refiriéndose a otras misivas (hasta seis) que le había escrito, mencionando que en la sexta, de enero de 1764, y «para que esta carta no le parezca completamente inútil», le había enviado «una lámina con algunas de las flores de la corteza de la quina peruana».

Esa es la carta que, por fin, recibió Linneo, quien respondió con otra (no datada):

Carlos Linneo saluda al ilustrísimo y expertísimo varón, el señor doctor José Celestino Mutis.

Oportunamente recibí, hace ocho días, tu carta con fecha de 24 de septiembre de 1764, y fui en alto grado emocionado y alegrado por ella: contenía, en efecto, un bellísimo dibujo de la corteza de quina, junto con hojas y flores. Estas flores, que yo nunca había visto anteriormente, me dieron una idea verdadera de este rarísimo género, muy distinto de la que me había formado por las figuras del señor Condamine. Por todas estas cosas, y por cada una en particular, te quedo profundamente agradecido.

Si en adelante quisieras seguir favoreciéndome con tus cartas, te ruego que el rótulo venga dirigido a la Real Sociedad de Ciencias de Uppsala: así las recibiré con toda certeza, y además libres de gastos; por la última tuya tuve que pagar al correo nada menos que un ducado belga.

En estos días ha entrado en prensa una nueva edición de Systema naturae, *que resultará casi dos veces más extensa que las anteriores. El primer tomo contiene más de seis mil animales, y así sucede en los demás. Espero que esta edición quede terminada antes de un año. Si tienes alguna cosa que aumente esta colección, te pido por favor que me la comuniques en tiempo oportuno, y verás hecha honorífica mención de tu nombre en cada caso.*

Envío esta carta en sobre dirigido al señor Pellman, porque ignoro por qué otro camino te pueda llegar con seguridad, pues veo por tu carta que no has recibido las mías, con excepción de la última.

Interesante es, asimismo, otra carta que Linneo dirigió a Mutis el 20 de mayo de 1774, casi un año después de la del gaditano:

He recibido puntualmente en estos días tu carta con fecha del 6 de junio de 1773, con mayor gusto nunca en toda mi vida, pues contenía una riqueza tal de plantas raras y aves que me he quedado completamente pasmado.

Te felicito por tu nombre inmortal, que ningún tiempo futuro podrá borrar.

En los últimos ocho días he examinado, al derecho y al revés, de día y de noche, estas cosas, y he saltado de alegría cuantas veces aparecían nuevas plantas, nunca vistas por mí.

Plantas: Nº. 21 [en el reverso de la carta de Linneo aparece una lista numerada de 146 nombres de plantas y animales]. La llamaré Mutisia. *Jamás he visto una planta más rara: su yerba es de clemátide; su flor, singenésica. ¿Quién había oído hablar de una flor compuesta con tallo trepador, zarcilloso, pinado, en este orden natural?*

[...] Contesté puntualmente a tus cartas; me duele que no te hayan llegado [...]

No hagas nombres de géneros de los de tus amigos o de otras personas que no tienen merecimientos en esta ciencia; en efecto, vendrá un tiempo que los borrará del modo que fácilmente prevén.

Mutis y Linneo hijo

Pero la vida, la edad, no tiene en cuenta lo poco o mucho que las personas hayan podido ofrecer al patrimonio común de la humanidad. Linneo sufrió no mucho después de la anterior carta el devastador paso del tiempo, como explicaba su hijo, también de nombre Carlos Linneo, a Mutis el 6 de noviembre de 1777:

Muchos años ha, varón muy célebre, que traigo frecuentemente a la memoria las hermosísimas cosas de historia natural que has remitido a mi padre; pero, entre todas, aquella hermosísima colección de plantas. Desde entonces no ha vuelto a recibir otra carta mi padre, ni, al desconocer en qué país te hallas, ha podido escribirte. Fue para mí gustosísima la conversación que sobre este asunto tuve hace poco con nuestro cónsul de Cádiz, mi estimadísimo amigo el señor [Hans Jacob] Gahn, quien me refirió que todavía te hallabas en América; y me franqueó la ocasión de poderte escribir. Mi padre fue acometido este año de una apoplejía, que finalmente vino a degenerar en perlesía del lado derecho, de modo que ni puede escribir ni aun leer; pero su entendimiento no está muy debilitado. Sus cargos públicos de enseñanza de la botánica, zoología, materia médica y nutrición se me han transferido con permiso del rey; hallándome ya constituido profesor público de estas ciencias en la Universidad de Uppsala, y prefecto del huerto académico. Para cumplir bien y desempeñar estos cargos, considero cuanto necesito y cuán útil me sea (habiendo ya dado principio a mi profesión en este año) un extendido comercio literario con los eruditos de Europa. Será para mí de mucho gusto si logro entablarlo también contigo. En el año siguiente pienso hacer una nueva edición de Systema naturae, *y también un suplemento. Si para este tiempo me quisieres mandar algunas plantas, me será de mucha complacencia, quedando a mi cuidado citarte en las que hallase nuevas.*

¿Has logrado ver la nueva edición que hizo mi padre, y sus Mantisas, *en que se halla citado tu nombre frecuentemente? Si no tienes estas obras te las remitiré luego que yo sepa.*

He sabido que has hallado nuevamente la Cinchona *oficial cerca de Santafé. Quisiera tener un ejemplar de ella. Lo consiguió el señor Gahn, pero lo perdió en el camino. Tenemos también muchos remedios en las oficinas farmacéuticas (son las boticas) cuya naturaleza se ignora botánicamente, quiero decir, se ignoran las plantas de donde se toman. Tú, ¡oh! varón muy célebre, tienes la fortuna de habitar en ese felicísimo país en donde se pudieran descubrir e ilustrar estas cosas.*

Y, a continuación, detallaba algunas preguntas:

¿De qué árbol se saca el bálsamo del Perú? [...] ¿De dónde la goma elástica, o aquella resina elástica que se dobla y estira como el cuero? [...] En el país en que ahora te hallas, ¿crece por ventura aquella hermosísima planta que mi padre consagró a tu nombre, llamándola Mutisia, *según te anunció en otro tiempo? Si así fuere, quisiera pedirte otro ejemplar mejor; porque el que tenemos aquí está maltratado en las partes de la flor por las injurias del camino.*

El gran Linneo no vivió mucho. Y fue otro corresponsal de Mutis, que servía de intermediario en las difíciles comunicaciones epistolares entre América y Suecia, citado en la carta anterior, el naturalista y cónsul de Suecia en Cádiz Hans Jacob Gahn, quien le notificó la triste nueva en una carta fechada desde Estocolmo el 15 de abril de 1778:

Ya se murió el viejo Linneo. Sé lo que lo sentirá vuesamerced, como lo sentimos todos, tarde tendrá su igual; pero su hijo, quedándose con el gabinete, manuscritos y la instrucción más inmediata, hará lo que podrá por mantener la claridad de aquel nombre y, si me atrevo a decirlo, la Presidencia de aquella ciencia.

Mutis expresó su pesar al joven Linneo con una extensa carta (de la que no se conserva la fecha):

Apenas puedo dar principio a esta carta por el golpe de lágrimas que bañan mis ojos en esta ocasión que recibo la tuya, ¡oh varón humanísimo!, pensando yo en otro tiempo escribirte lleno de gozo y complacencia. Al tiempo de abrir un pliego en que incluía a mi amado hermano, que habita en Cádiz, una carta con inscripción de mano extranjera, aún no pude cerciorarme de quién fuese; y leyendo la de mi hermano, con bastante sobresalto comencé yo a sospechar que estaba ya en peligro o ya del todo extinguida la vida preciosísima del caballero Linneo. En efecto, después de bien leída, me acabé de enterar con bastante pena que ya había muerto aquel grande hombre, como se anunciaba en los escritos públicos; quiero decir que falleció tu amado padre, cuya fiel amistad tuve el grande honor de cultivar por muchos años, venciendo la grande distancia que media entre los habitantes del polo y del ecuador.

Desgraciadamente, tampoco vivió mucho el joven Linneo, que tanto prometía. Falleció, de una enfermedad hepática, en 1783. Tenía 42 años.

PARA SABER MÁS

Archivo epistolar del sabio naturalista don José Celestino Mutis. Tomos I, III y IV. Edición dirigida por Guillermo Hernández de Alba. Editorial Kelly, Bogotá, 1968 (tomo I), 1975 (tomo III) y 1978 (tomo IV).

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Actualmente dirige la colección de libros *Grandes ideas de las matemáticas*, de Ediciones El País.



Las constantes universales del caos (2)

De los sistemas dinámicos a la renormalización

El mes pasado, en homenaje al físico matemático Mitchell Feigenbaum, fallecido recientemente, describimos la ruta al caos por bifurcación de período de la función logística,

$$f(x_n, \mu) = \mu x_n(1 - x_n) ,$$

la cual daba lugar al famoso árbol de Feigenbaum. Vimos que, en dicho diagrama, Feigenbaum encontró numéricamente que las distancias sucesivas entre puntos de bifurcación (*véase la figura*),

$$\Delta_n = \mu_{n+1} - \mu_n ,$$

se contraían geométricamente,

$$\Delta_{n+1} \approx \Delta_n/\delta ,$$

y que, en el límite en el que n tiende a infinito, δ tomaba el valor

$$\delta = 4{,}6692016... ,$$

hoy conocido como la constante δ de Feigenbaum.

En su momento, el propio Feigenbaum narró así lo que ocurrió tras su descubrimiento numérico:

Dediqué parte del día a tratar de aproximar mediante combinaciones de constantes conocidas el valor 4,669 de la tasa de convergencia. La tarea resultó infructuosa, salvo por el hecho de que dicho valor quedó grabado en mi memoria.

Poco después recordé que Paul Stein afirmaba que la cascada de bifurcaciones no es una propiedad exclusiva de la función logística, sino que también ocurre, por ejemplo, con $x_{n+1} = \mu \,\mathrm{sen}(\pi x_n)$. Mi teoría funcional dependía fuertemente de que la no linealidad fuera cuadrática y no trascendente. De modo que mi interés en el problema aumentó.

Quizás un mes más tarde decidí computar numéricamente los valores μ_n para el caso trascendente. Este problema resultó mucho más lento de computar que el cuadrático. De nuevo aparecía la convergencia geométrica de μ_n y, otra vez sorprendentemente, el valor era 4,669, que recordaba perfectamente gracias a mis esfuerzos vanos para aproximarlo.

Azuzado por las palabras del matemático Paul Stein, Feigenbaum encontró que sus constantes tomaban siempre el mismo valor para funciones unimodales que presentasen un máximo de orden cuadrático. De esta manera, obtuvo por primera vez un resultado universal en funciones discretas que, más tarde, se vería refrendado por multitud de datos experimentales.

Sin embargo, nos faltaba explicar cómo determinó Feigenbaum el valor y la universalidad de sus constantes a través de su «teoría funcional», como apuntaba en su texto. Para verlo, hoy seguiremos el esquema simplificado que presenta Steven Strogatz en su maravilloso libro *Nonlinear dynamics and chaos.*

Leyes de potencias

De la definición de la constante δ es fácil ver que

$$(\mu_\infty - \mu_n) \approx A\delta^{-n} ,$$

donde tanto μ_∞ (el valor de μ que marcaba la frontera entre el régimen periódico y el caótico), como la constante A dependerán de la función concreta que estemos considerando.

En la columna anterior vimos también que Feigenbaum determinó numéricamente que

$$d_{n+1} \approx d_n/\alpha ,$$

donde d_n denota la distancia vertical entre el «punto superestable», al que aquí llamaremos x^*, y la rama más cercana en cada intervalo de ramificación (*véase la figura*). En el límite, la constante α vale

$$\alpha = -2{,}5029078...$$

(donde ahora asignamos a d_n signo positivo si se encuentra por encima de x^*, y signo negativo si está por debajo). De modo que, al igual que antes, tendremos que

$$d_n \approx B\alpha^{-n} ,$$

donde B será otra constante que dependerá de la función f.

Estas leyes de potencias le recordaron a Feigenbaum las ecuaciones que describen las transiciones de fase en mecánica estadística, como la pérdida de magnetización en un material ferromagnético cuando la temperatura supera cierto valor crítico. Cerca de una transición de fase, el sistema se torna autosemejante: presenta el mismo aspecto con independencia de la escala a la que lo analicemos. Además, los físicos habían descubierto que las transiciones de fase podían agruparse en «clases de universalidad»: había sistemas físicos muy distintos que, sin embargo, obedecían las mismas leyes cuando se hallaban muy cerca del punto crítico.

Fue esto, junto a la evidente autosemejanza del árbol y la universalidad de las constantes, lo que hizo sospechar a Feigenbaum que, en el límite, las bifurcaciones se tornaban estrictamente autosemejantes con independencia de cuál fuese la función f. De ser el caso, tal vez podría atacar el problema con los mismos métodos de renormalización que, en los años setenta, había propuesto el premio nóbel Kenneth Wilson y que tanto éxito habían cosechado en física estadística y teoría cuántica de campos.

Renormalización

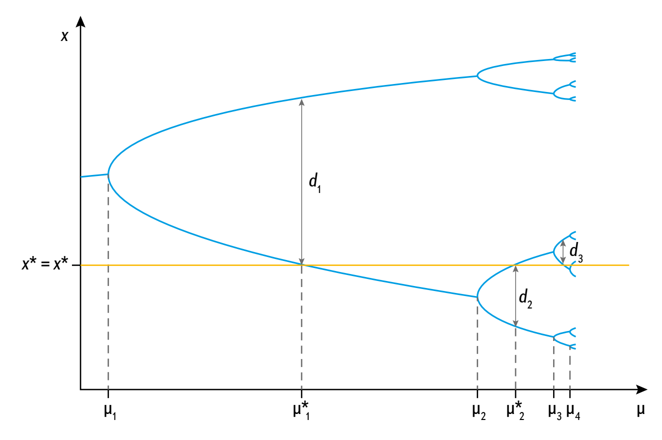
Feigenbaum observó que, si desplazaba el origen de su función al punto superestable x^*, de modo que el máximo se presentase siempre en $x = 0$, la nueva función cumplía la igualdad aproximada

$$f(x, \mu_0^*) \approx \alpha f^2(x/\alpha, \mu_1^*) ,$$

donde con el superíndice 2 queremos indicar la composición de funciones, $f(f(x))$,

y donde μ^*_n denota el valor de μ donde la ramificación n-ésima del árbol contiene el punto superestable x^* (es decir, el valor de μ donde la ramificación se corta con la recta $x = x^*$, *véase la figura*).

La igualdad anterior nos está diciendo lo siguiente: si redefinimos adecuadamente x y μ, veremos que f^2 adopta la misma forma funcional que f. En concreto, todo lo que tenemos que hacer es cambiar la escala de x por un factor α y trasladar apropiadamente el valor de μ^*. Esta manera de proceder (obtener una nueva función redefiniendo los parámetros que intervienen en la función original) es justamente la esencia del proceso de renormalización: Feigenbaum había encontrado cómo renormalizar la función compuesta f^2 para convertirla en f.



PRIMERAS RAMIFICACIONES del árbol de Feigenbaum para la función logística $f(x,\mu)$. Las constantes δ y α se definen en términos de los valores μ_n y las distancias d_n indicadas en la figura. En el eje vertical, el punto x^* marca los «puntos superestables» (aquellos donde la primera derivada se anula).

Pero llegados aquí podemos dar más pasos, ya que lo mismo sucederá entre f^2 y f^4. En general, tras renormalizar n veces, encontraremos que

$$f(x, \mu^*_0) \approx \alpha^n f^{2^n}(x/\alpha^n, \mu^*_n) .$$

Fue aquí donde Feigenbaum determinó numéricamente que, solamente si α tomaba el valor −2,5029078..., se cumplía que, cuando n tiende a infinito:

$$\alpha^n f^{2^n}(x/\alpha^n, \mu^*_n) \to g_0(x) ,$$

donde $g_0(x)$ es una función universal; es decir, idéntica para cualquier función f, siempre que esta última sea unimodal y con un máximo cuadrático.

A primera vista algo así puede parecer increíble. Sin embargo, esta convergencia se torna algo más intuitiva si observamos que el argumento x/α^n tiende a cero a medida que n crece, de modo que $g_0(x)$ solo depende de f a través de su comportamiento en un entorno de $x = 0$. Dicho entorno va haciéndose más y más pequeño a medida que renormalizamos una y otra vez, con lo que al final la dependencia con el comportamiento global de f se perderá.

Lo anterior significa que el orden cuadrático del máximo es el que finalmente determina $g_0(x)$. De hecho, si f tiene un máximo de otro orden, la constante α tomará otro valor y el límite será una función distinta. Esto define el análogo de las clases de universalidad que aparecen en las transiciones de fase.

En el borde del caos

Si repetimos el esquema pero comenzando a renormalizar a partir de la bifurcación i-ésima en vez de en la primera, es decir, con $f(x, \mu^*_i)$ en vez de $f(x, \mu^*_0)$, encontraremos otras funciones universales que cumplen ecuaciones parecidas:

$$\alpha^n f^{2^n}(x/\alpha^n, \mu^*_{i+n}) \to g_i(x) .$$

Justo en el borde del caos, cuando se cumple $\mu_i = \mu_\infty$, obtendremos una función límite, la cual suele denotarse simplemente como $g(x)$ y que resulta especialmente interesante, puesto que en el proceso de renormalización ya no necesitamos trasladar el parámetro de control:

$$f(x, \mu^*_\infty) \approx \alpha f^2(x/\alpha, \mu^*_\infty) .$$

Esta última igualdad lleva a concluir que la función universal $g(x)$ debe satisfacer la ecuación funcional

$$g(x) = \alpha g^2(x/\alpha) ,$$

la cual resulta ser su definición implícita: $g(x)$ se define en términos de sí misma.

Ahora notemos que, como hemos desplazado el origen de f a su máximo:

$$g'(0) = 0 .$$

Si a esto añadimos, sin pérdida de generalidad, una escala para x tal que $g(0) = 1$, dotaremos de solución única a nuestra ecuación funcional. En particular, para $x = 0$ tendremos que $g(0) = \alpha g^2(0)$. Y, como $g(0) = 1$, vemos que:

$$\alpha = 1/g(1) .$$

En otras palabras, podemos determinar la constante α de Feigenbaum a partir del valor de la función universal en $x = 1$.

¿Es posible determinar $g(x)$? Feigenbaum lo hizo de manera aproximada en términos de su desarrollo de Taylor. Su teoría funcional también le permitió demostrar que:

$$\delta \approx \alpha^2 + \alpha + 1 ,$$

una identidad aproximada que arrojaba un valor de δ muy cercano al calculado numéricamente.

La función $g(x)$ es un punto fijo de la transformación de renormalización de duplicación de período para funciones cuadráticas. Todavía nadie ha logrado encontrar una forma cerrada para ella; sin embargo, las comparaciones entre los experimentos numéricos y las expansiones de Taylor de alto orden son excelentes.

Feigenbaum extendió su teoría a funciones unimodales con máximos de órdenes superiores al cuadrático y demostró que cada orden representaba una clase de universalidad, con sus constantes características. Los hallazgos y conjeturas de Feigenbaum fueron rigurosamente demostrados más tarde por otros matemáticos. Su intuición había acertado de pleno, lo que otorgó respetabilidad matemática a la teoría del caos y abrió una vía de exploración en sistemas dinámicos con herramientas adaptadas de la mecánica estadística, como la renormalización. Hoy, dichas herramientas todavía siguen proporcionando réditos.

PARA SABER MÁS

Universal behavior in nonlinear systems. Mitchell J. Feigenbaum en *Universality in chaos*. Dirigido por Predrag Cvitanović. Routledge, 1983.

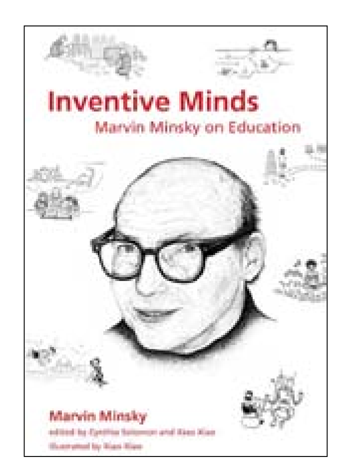
A simpler derivation of Feigenbaum's renormalization group equation for the period-doubling bifurcation sequence. S. N. Coppersmith en *American Journal of Physics*, vol. 67, n.º 52, 1999.

Nonlinear dynamics and chaos. Steven Strogatz. Westview Press, 2001.

EN NUESTRO ARCHIVO

Problemas físicos con muchas escalas de longitud. Kenneth G. Wilson en *IyC*, octubre de 1979. Reeditado para «Grandes ideas de la física», colección *Temas* de *IyC*, n.º 80, 2015.

Las constantes universales del caos. Bartolo Luque en *IyC*, septiembre de 2019.



INVENTIVE MINDS
MARVIN MINSKY ON EDUCATION

Marvin Minsky
Edición de Cynthia Solomon y Xiao Xiao
The MIT Press, 2019.

Marvin Minsky: pensar el pensamiento

Seis excelentes ensayos sobre educación de uno de los creadores de la inteligencia artificial

Marvin Lee Minsky (1927–2016) es especialmente conocido como uno de los padres de la inteligencia artificial, campo que fundó junto con John McCarthy y Claude Shannon en la Conferencia de Dartmouth del ya lejano 1956. Junto a Seymour Papert (1928-2016), destacado discípulo de Jean Piaget e inventor del lenguaje de programación Logo, Minsky creó el prestigioso Instituto de Inteligencia Artificial en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. También se le deben el primer simulador de redes neuronales (1951), el casco de realidad virtual (1963) o el microscopio confocal (1957), habiendo contribuido además a un número destacado de especialidades como las redes neuronales, las descripciones gráficas simbólicas, la geometría computacional, la semántica computacional, la percepción mecánica o el aprendizaje simbólico. En muchos casos, Minsky fue un pionero que anticipó ideas y soluciones que se desarrollarían años después.

Persona de gran creatividad y potencialidades en campos diversos, Minsky dedicó toda su vida gran atención a la cuestión educativa, pues estaba interesado en analizar los procesos cognitivos que las personas experimentan desde la infancia como referencia para la creación de elementos con inteligencia artificial, y viceversa: se interesaba en cómo los usos computacionales, de todo tipo de programas y mecanismos, podían ayudar a desarrollar mentes más creativas. De gran interés, *Inventive minds* nos invita a conocer algunos de los pensamientos clave de Minsky sobre diversos temas educativos.

El primer acierto de la obra ha sido la labor de selección de los seis ensayos que la conforman, realizada por Cynthia Solomon y Xiao Xiao, y la decisión de complementar cada uno de ellos con un texto actual que, de la mano de prestigiosos expertos (Hal Abelson, Walter Bender, Alan Kay, Margaret Minsky, Brian Silverman, Gary Stager, Mike Travers y Patrick Henry Winston), contextualiza los escritos de Minsky y discute su vigencia. El desarrollo tecnológico se ha producido de forma acelerada desde que Minsky escribió estos ensayos y, por tanto, cierta revisión era imprescindible. También se nos presenta al autor en múltiples facetas personales, incluidas sus aficiones al dibujo, la música y las matemáticas.

Considere el lector estas seis preguntas: ¿pueden ser las computadoras y sus programas un instrumento para que los niños jueguen y descubran, como antes lo hacían con juegos de construcciones? ¿Qué es lo que dificulta el aprendizaje de las matemáticas? ¿Cuáles son las consecuencias de ordenar la educación segregando por edades? ¿Cómo enseñar a los niños buenas maneras de «pensar sobre el pensar», con nuevos actores motivadores o resolviendo problemas interesantes? Al cuestionar la educación en general, ¿qué tipo de habilidades deberían recibir mayor atención y qué cambios deberían producirse? ¿Cuáles son los temas y relaciones clave en educación, psicología y computación?

Si estas preguntas le han parecido interesantes, los seis ensayos de esta obra le proporcionarán respuestas. No es este un libro sobre tecnología, computación o robots, sino uno sobre procesos de aprendizaje y sobre la naturaleza de los sistemas (humanos o artificiales) con capacidad de aprender. Presenta ideas donde se entrelazan palabras mágicas como mente, pensamiento, aprendizaje, formación y creatividad, superando las rutinas carentes de motivación y apostando por la mente inventiva, lo que da título a la obra. Veamos a continuación algunos de los pensamientos clave que nos ofrece Minsky en ella.

A través de los juegos elementales de construcciones, como el Lego o el mecano, se puede invitar a los niños a desarrollar su creatividad sin límites. Con el programa Logo, de Seymour Papert, hay todo un mundo por descubrir. Y con programas más avanzados también: entender el funcionamiento de las computadoras y aprovechar sus programas ofrece hoy un gran recurso formativo.

Muchos estudiantes piensan que no les gustan las matemáticas, cuando, en realidad, lo que no les gusta es lo que se les enseña en clase y cómo se les enseña. Faltan visiones más amplias que las rutinas aritméticas, así como mapas conceptuales y cuestiones relevantes de la vida diaria que también «den sentido a aprender» geometría, lógica, mecánica, estadística, combinatoria, álgebra o topología, e incluso a aprender de los errores cometidos.

No es evidente que la actual organización escolar por grupos de la misma edad favorezca la formación de los niños. Otras posibilidades más abiertas y un nuevo papel de los profesores podrían dar más oportunidades de progreso personal y contextos mucho más enriquecedores que los actuales.

Dado que el pensamiento es el instrumento principal para todo lo que hacemos, merece la pena enseñar a los niños buenas maneras de «pensar sobre el pensamiento». La resolución de problemas y todas las estrategias posibles para abordarlos constituyen un gran recurso educativo, y en el caso de las matemáticas, un motor imprescindible. Seguir a profesores, mentores, guías o consejeros puede influir también positivamente.

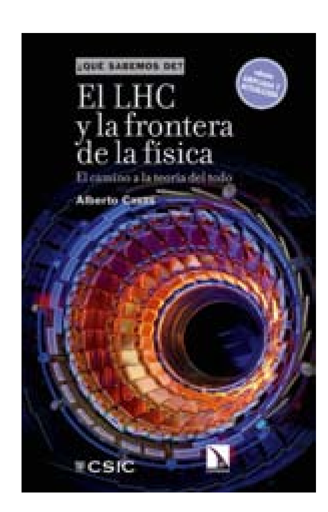
Si la educación debe preparar para el futuro, merece la pena reconsiderar la actual organización educativa y sus programas. El desarrollo del pensamiento crítico, las habilidades cognitivas, el talento y los recursos mentales exige hoy nuevos enfoques, representaciones y modelos de la realidad. Los nuevos recursos computacionales han ido ofreciendo en este ámbito nuevas oportunidades.

Si el objetivo es mejorar el pensamiento, no se trata de introducir la psicología en las escuelas, sino de plantear cómo aprenden los humanos: mediante los errores cometidos, reflexionando, desarrollando nuevas maneras de pensar... Múltiples elementos de la cibernética, la computación o la robótica pueden ser clave en este objetivo de pensar más y mejor.

La edición del libro ha sido muy cuidada, con excelentes notas, bibliografía y los encantadores dibujos naíf de Xiao Xiao. Lo único que se podría señalar como limitación es que el autor no llegue a examinar las posibilidades reales de los cambios que sugiere, ni muestre un conocimiento actualizado de los avances en educación matemática que ya se habían producido cuando se escribieron los ensayos.

A partir de la lectura de *Inventive minds* cabe que algunos lectores opten por profundizar en otras obras ya clásicas de Minsky como *The society of mind* (2007), o *The emotion machine: Commonsense thinking, artificial intelligence, and the future of the human mind* (2006). Otros lectores, de forma más directa, quizá puedan iniciar una reflexión profunda sobre la educación actual y sobre las necesarias transformaciones que pueden facilitar las ciencias de la computación, revisando lo que ha sido su formación personal y lo que hubiese podido ser con planteamientos más abiertos y transversales. Y si el lector se dedica a la educación, tal vez los ensayos de Minsky le impacten hasta el extremo de replantearse muchos de sus principios.

—Claudi Alsina
Universidad Politécnica de Cataluña



EL LHC Y LA FRONTERA DE LA FÍSICA
EL CAMINO A LA TEORÍA DEL TODO
Alberto Casas
Catarata, 2019

Un viaje alucinante al fondo de la naturaleza

Los grandes aceleradores de partículas y el «sentido común» de la realidad física

Una comparación del primer ciclotrón, construido por Ernest Lawrence en 1930 y el cual podía sostener en la palma de su mano, con los aceleradores circulares contemporáneos de decenas de kilómetros de longitud nos muestra en qué medida la física experimental de partículas elementales se ha adentrado en el territorio de la gran ciencia. La investigación en este campo, iniciada a principios del siglo xx en pequeños laboratorios universitarios, ha pasado a hacerse en grandes instalaciones similares a complejos industriales. Los grupos experimentales reducidos se han convertido en colaboraciones en las que participan cientos, cuando no miles, de personas.

La etapa más reciente en este proceso la encarna el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), la infraestructura científica más compleja jamás construida, que nos ha permitido estudiar la naturaleza a escalas nunca antes exploradas. Gracias a él hemos podido confirmar la existencia del bosón de Higgs, el último ingrediente del modelo estándar que quedaba por descubrir.

Para conmemorar su número 100, la colección «¿Qué sabemos de?», de la editorial Catarata con la colaboración del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, ha publicado una edición actualizada de la obra que inauguró la serie: *El LHC y la frontera de la física*, de Alberto Casas. Cuando apareció la primera, en 2009, faltaban algunos meses para que el LHC comenzara sus operaciones. Por eso esta se completa con un apéndice en el que se valoran los casi diez años de vida del acelerador. Y lo hace no solo analizando sus logros en este período (el descubrimiento y estudio del bosón de Higgs), sino también sus posibilidades de descubrir nueva física a corto y medio plazo.

Uno de los propósitos del libro es relatar de forma accesible y entretenida la historia y las características del acelerador, la razón de su construcción y cómo se efectuó la primera detección del Higgs [*véase* «El descubrimiento del bosón de Higgs», por Alberto Casas; Investigación y Ciencia, agosto de 2012]. También explicar los beneficios no estrictamente científicos de la inversión en gran ciencia. Pero *El LHC y la frontera de la física* es mucho más que eso. En algo menos de 140 páginas, el autor consigue embarcarnos en un viaje de descubrimiento que sin duda resulta tan fascinante como el destino final. Partiendo de las nociones más básicas de relatividad y mecánica cuántica, y al hilo de la historia, aprendemos cómo la combinación de experimentos astutos e ideas teóricas audaces fue conformando nuestra imagen del mundo de las partículas subatómicas.

El autor es uno de los grandes expertos internacionales en física más allá del modelo estándar, razón por la que el libro no se queda en una mera descripción de los muchos éxitos del modelo. Nos da cuenta de sus limitaciones y de cómo estas apuntan a la existencia de física aún desconocida, que quizás el LHC (o sus sucesores) puedan detectar en el futuro. Aprendemos entonces sobre el problema de la jerarquía o sobre algunos escenarios de nueva física, como la supersimetría o las dimensiones adicionales. También sobre lo infundado de los temores de que el LHC pudiera provocar un apocalipsis global.

Más allá de la discusión de teorías científicas, el libro nos enfrenta con algunas cuestiones que, aunque no son habituales en la bibliografía de divulgación, tienen gran importancia para una adecuada percepción de la ciencia por parte del gran público. Por ejemplo, qué hace especial a la ciencia como forma de conocimiento, dónde radica su efectividad para describir y controlar la naturaleza, o cómo la retroalimentación de teoría y experimento dota al conocimiento científico de su robustez y fiabilidad.

Una cuestión que constituye el verdadero *leitmotiv* del libro es el concepto de «teoría efectiva» como base de nuestro conocimiento de la naturaleza. La física describe la realidad acotándola en escalas y adaptando los términos de la descripción a la escala correspondiente. Así, a un ingeniero le basta con conocer algunas propiedades físicas de los materiales con los que diseña un puente, codificadas en unos cuantos parámetros, sin preocuparse por la estructura atómica de la cual se derivan. Un análisis en estos términos es perfectamente legítimo para el ingeniero, pero no

para el físico del estado sólido que aspira a entender las propiedades microscópicas del material. La física newtoniana, que basta para construir el puente, deja de funcionar a pequeñas distancias, donde debe ser reemplazada por la mecánica cuántica. Al mismo tiempo, tenemos que abandonar la imagen cotidiana de un sólido continuo para pensar en términos de electrones y átomos.

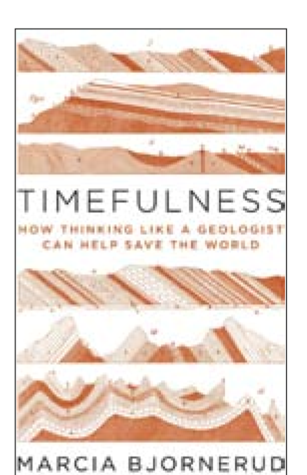
Y es que, como explica el autor, nuestro sentido común no es extrapolable a todas las escalas. O dicho de otra forma: cada escala de distancias tiene su propio «sentido común», su teoría efectiva. La idea de cómo uno reemplaza a otro a medida que nos movemos entre escalas reviste una importancia clave para aclarar toda posible confusión sobre el verdadero funcionamiento de la física. Clarifica, en particular, cómo el carácter progresivo y acumulativo de esta ciencia se deriva de completar las teorías existentes, extender su dominio de aplicabilidad y empujar en el proceso la frontera del conocimiento.

Esta secuencia de teorías efectivas, con sus sucesivos dominios de validez, conecta con la otra trama subyacente del libro: el reduccionismo explicativo. Nuestra comprensión de los fenómenos naturales y de su multiplicidad se basa en la posibilidad de describirlos en términos de estructuras más simples. Desde la unificación de la física terrestre y celeste llevada a cabo por Newton en el siglo xvii hasta la física de partículas contemporánea, este ha sido probablemente el principio intelectual más exitoso en la historia del pensamiento científico. Llevado hasta sus últimas consecuencias, nos conduce a la búsqueda de esa «teoría del todo» a la que el subtítulo del libro hace referencia como meta última de la física de altas energías.

Decía Ortega y Gasset que la claridad es la cortesía del filósofo. Y sin duda también la del científico, especialmente cuando se dirige a un público amplio. En *El LHC y la frontera de la física* su autor nos demuestra unos altísimos niveles de cortesía excepcionales en la divulgación actual. Su claridad se basa precisamente en no renunciar un ápice al rigor ni a la profundidad en la presentación, y en evitar, además, simplificaciones extremas que puedan distorsionar o trivializar el contenido.

La reedición actualizada de la obra de Casas es una excelente noticia para la divulgación en castellano y para el público interesado en el presente y el futuro de la física de partículas. Pero este libro es, además, una lectura especialmente recomendable en esas edades formativas en las que es necesario alimentar la curiosidad y estimular el pensamiento más allá de los meros contenidos académicos. Se trata de un libro conciso, claro, ameno y riguroso, que de engrosar las bibliotecas de los centros de enseñanza media bien podría despertar o reorientar más de una vocación científica.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Instituto Universitario de Física Fundamental
Universidad de Salamanca



TIMEFULNESS
HOW THINKING LIKE A GEOLOGIST CAN HELP SAVE THE WORLD
Marcia Bjornerud
Princeton University Press, 2018

La importancia del tiempo geológico

De Hutton a la geocronología moderna

La vida del ser humano, y la de la naturaleza en general, va asociada al tiempo. En el día a día es el reloj el que marca nuestros pasos y actividades, pautados por la hora oficial local. Al respecto, curioso es el caso del archipiélago ártico de Svalbard, sin tiempo oficial cuando la geóloga Marcia Bjornerud preparaba su tesis doctoral, en 1984, debido a un largo pleito entre rusos y noruegos sobre el huso que debían seguir, si el de Moscú o el de Oslo. Allí el trabajo de campo no empezaba hasta julio, cuando se rompían los hielos y podía navegarse, y duraba hasta septiembre, coincidente con las 24 horas de luz solar del verano. Una época sin claves externas para el sueño y donde se pierde la sensación de paso del tiempo, como si hubiera quedado congelado.

Timefulness constituye una suerte de introducción a la geología cuya lectura y comprensión se ven facilitadas por el recurso a frecuentes metáforas y analogías. Así, la propia Tierra se compara a un melocotón, explica la autora: con hueso o núcleo, carne o manto, y piel o corteza. La autora hace gala, además, del manejo solvente de muchos marcos temporales de la historia del planeta, con sus 4600 millones de años de antigüedad. Un dominio que el libro quiere extender a la sociedad en general, pues, según se queja la autora, la persona culta contemporánea carece del sentido de tiempo geológico: cuánto duran los grandes capítulos de la historia de la Tierra, cuál fue la velocidad de cambio durante períodos precedentes de inestabilidad ambiental, o cómo se desarrollan las escalas temporales de los sistemas de aguas freáticas y otras maravillas de la naturaleza.

Desde las primeras lecciones se enseña en geología que las rocas no son sustantivos, objetos, sino verbos, procesos. Algunos procesos quedan a la vista: erupciones volcánicas, acreción de un arrecife coralino, desarrollo de un cinturón montañoso. Dondequiera que se mire, las rocas dan testimonio de sucesos que se desplegaron durante largos períodos de tiempo. En el siglo xviii comenzó a descubrirse la antigüedad de las diversas clases de roca que componen el planeta, la escala temporal geológica, y con afán científico empezó a plantearse la cuestión de la edad de la Tierra. De acuerdo con el relato del Génesis, hasta entonces asumido en su literalidad, se aceptaban los 6000 años computados por James Ussher en 1654. Este arzobispo de la Iglesia de Irlanda había calculado incluso la fecha de la creación: un 23 de octubre del año 4004 antes de nuestra era, que cayó en domingo.

En 1789, sin embargo, James Hutton se percató de la vastedad del tiempo geológico en un saliente de Siccar Point, en la costa escocesa. Muchos habían visto aquel promontorio, pero solo Hutton supo inferir en aquellos horizontes rocosos un registro vivo de paisajes desaparecidos. Las rocas verticales subyacentes representaban una antigua cadena montañosa donde los estratos marinos habían sido inclinados por una alteración de la corteza. Y la superficie que truncaba ese horizonte representaba un intervalo de erosión, prolongado lo suficiente para arrasar montañas, sobre cuyas ruinas se fueron acumulando sedimentos, las rocas superiores. A partir de la tasa de erosión del suelo, Hutton dedujo que la discontinuidad representaba un largo intervalo temporal, infinito si lo comparábamos con la edad de la Tierra de acuerdo con la interpretación literal de la Biblia.

Hutton dio un paso más y rompió con la creencia de que el pasado y el presente de la Tierra estaban gobernados por regímenes distintos, la idea de que en el pasado habría habido episodios violentos, como el diluvio universal, en tanto que el presente sería un período de estabilidad. Hutton introdujo la idea central de la geología, el uniformismo, según la cual los procesos del presente son los mismos que los que operaron en el pasado geológico. En su *Theory of the Earth*, de 1789, propuso la iteración de un ciclo ilimitado de acumulación de rocas, levantamientos, erosión y renovación de la Tierra. Charles Lyell siguió la senda de Hutton en su canónico *Principles of geology*, que más tarde inspiraría a Charles Darwin su teoría de la evolución [*véase* «Las leyes de Lyell, a examen», por Michael Rampino; Investigación y Ciencia, octubre de 2018].

Los primeros intentos de transcribir el registro geológico en una historia de la Tierra se basaron en la idea de que determinados tipos de roca se habían formado en el ancho mundo en distintos momentos del pasado. Granitos y gneises constituían las rocas originarias o primarias, en tanto que las areniscas y calizas eran secundarias. Gravas y depósitos de arena constituían materiales terciarios. Al cuaternario pertenecían sedimentos sin cementar. A comienzos del siglo XIX se introdujeron claves orgánicas para determinar la edad de los estratos: determinadas conchas y otros restos fósiles se daban en horizontes o lechos característicos. Se asociaron mamíferos con el Cenozoico, reptiles con el Mesozoico y peces y trilobites con el Paleozoico.

Pasado el ecuador del siglo XIX, William Thomson, más conocido como Lord Kelvin, atacó la idea huttoniana de una Tierra infinitamente vieja como una violación de la segunda ley de la termodinámica. Comenzó a publicar una serie de ensayos sobre la edad de la Tierra de acuerdo con la física, atendiendo en particular a la velocidad de enfriamiento del planeta y a la vida media del Sol. Dedujo una edad de unos 20 millones de años.

En 1905, Ernest Rutherford demostró que la radiactividad era un proceso de desintegración exponencial y reconoció de inmediato su poder de reloj natural para determinar la edad de rocas portadoras de uranio. Pero fue un joven estudiante de física del Imperial College, Arthur Holmes, quien acometiera el proyecto de recabar los primeros datos geológicos absolutos. Comenzó buscando muestras de rocas portadoras de uranio, como el zircón. Conocida la concentración de uranio y aplicando la ley de desintegración radiactiva, cabía determinar los años transcurridos desde la cristalización del mineral.

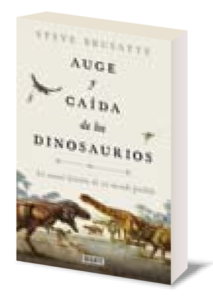
En 1911, a pesar de la comprensión todavía rudimentaria del fenómeno de la radiactividad, Holmes había obtenido ya la edad absoluta de media docena de rocas ígneas cuya edad relativa en la escala fundada en los fósiles dependía de sus relaciones con rocas sedimentarias. Hasta los años treinta no se comprendió la complejidad de la geoquímica de los isótopos del plomo. En 1929, Rutherford mostró que había dos isótopos del uranio, ^{238}U y ^{235}U, que producían dos isótopos del plomo al final de una larga serie de desintegraciones con vidas medias muy diferentes. Muy poco tiempo después, Alfred Nier, creador del espectrómetro de masas, identificó un tercer isótopo del plomo, no radiogénico. Se comprobó que las tres especies servían para datar rocas e incluso establecer la edad de la Tierra. A medida que se fue generalizando el uso del espectrómetro de masas, a finales de los cincuenta y decenio de los sesenta, la geocronología se convirtió en ciencia.

Hoy, gracias a la geocronología de alta precisión, a la observación directa de la Tierra por medio de satélites y a un siglo de seguimiento de sus signos vitales (temperatura, precipitación, comportamiento de los glaciares, reserva de aguas freáticas, nivel del mar y actividad sísmica), muchos de los procesos que parecían fuera del alcance del ser humano pueden ser cronometrados en tiempo real.

—*Luis Alonso*

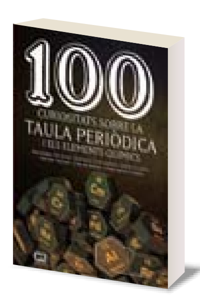
NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



AUGE Y CAÍDA DE LOS DINOSAURIOS
LA NUEVA HISTORIA DE UN MUNDO PERDIDO

Steve Brusatte
Debate, 2019
ISBN: 9788417636135
400 págs. (23,90 €)



100 CURIOSITATS SOBRE LA TAULA PERIÒDICA I ELS ELEMENTS QUÍMICS

S. Álvarez, E. Cremades, J. Duran, X. Duran, C. Mans y P. A. Vieta
Cossetània Edicions, 2019
ISBN: 978-84-9034-844-4
224 págs. (14,90 €)



ESO LO EXPLICA TODO

Dirigido por John Brockman
Con textos de R. Dawkins, F. Wilczek, S. Pinker, F. Dyson, L. Randall, S. Turkle, A. Gopnik y N. N. Taleb, entre otros
Deusto, 2019
ISBN: 978-84-234-1715-5
456 págs. (22,95 €)

Hace 50, 100 y 150 años

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

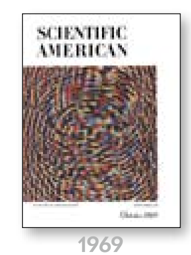
OCTUBRE

1969

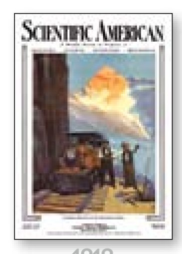
Ordenadores de burbujas

«Los Laboratorios Telefónicos Bell han dado a conocer un nuevo método para construir circuitos de procesado electrónico de datos mediante la manipulación del flujo de minúsculas “burbujas” magnéticas (en realidad, dominios magnéticos en forma de cilindros microscópicos incrustados en finas láminas de ferrita). Las burbujas pueden mantenerse en movimiento con menos energía que la necesaria para activar un transistor y, al tener un grosor de solo unas pocas longitudes de onda de luz, pueden empaquetarse con una densidad del orden de doscientas mil por centímetro cuadrado. Pueden crearse, eliminarse y desviarse para llevar a cabo funciones variadas: lógicas, de memoria, de conmutación y de conteo. Se han comprobado flujos de datos de tres millones de bits por segundo.»

El sistema quedó obsoleto en la década de 1980, eclipsado por la mayor rapidez del chip semiconductor y de la memoria flash.



1969



1919



1869

Caballos mecánicos

«El jefe de la oficina de correos de Madrás ha experimentado recientemente con tres automóviles como sustitutos de los vehículos de tracción equina para el transporte de la correspondencia. Se dice que esa experiencia es la primera de su clase en la India y que su éxito ha sido tal que ya va a suprimirse el uso de caballos.»

Caza de buen estilo

«En el informe de la Comisión Departamental que ha estado estudiando la protección de las aves silvestres en Gran Bretaña, se señala que ha aparecido un nuevo peligro para la vida de esos animales en forma de disparos y bombas lanzados desde aeroplanos. Recomienda la comisión que se prohíba emplear aeroplanos contra las aves silvestres.»

1869

Consumidores de arsénico

«Durante mucho tiempo, los hombres de ciencia que han pasado por la región austríaca de Estiria han informado de que en aquel lugar había gente que consumía arsénico. Sin embargo, esa información fue negada por otros, quienes afirmaban que el mineral blanco que se ingería era en realidad yeso. Movido por la importancia del asunto, el consejero médico real, el doctor Von Vest, dirigió una circular a los médicos de Estiria, pidiéndoles que le comunicaran sus experiencias al respecto. Se reunieron 17 informes. El distrito de Hartberg cuenta con no menos de cuarenta individuos entregados a ese hábito. De las distintas clases de arsénico, la preferida con mucho es el blanco, o matarratas, seguido del arsénico comercial amarillo y, tras este, el arsénico natural rojo. Sus consumidores empiezan con dosis del tamaño de una semilla de mijo y aumentan gradualmente esa cantidad. Toman la dosis a diario, a días alternos, o solo una o dos veces por semana. En el distrito de Hartberg prevalece la costumbre de suspender tan insensata práctica durante la luna nueva.»

La cuestión de si los humanos pueden adquirir tolerancia a esa sustancia tóxica parece seguir abierta.

1919

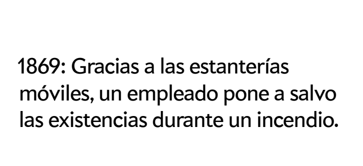
Cerco a la polio

«En EE.UU. nos estamos habituando cada vez más a las epidemias de poliomielitis. Antes de 1907, la parálisis infantil era una enfermedad infrecuente en este país. Desde 1907 se ha presentado, con intermitencia, en verano y en otoño. Podría decirse que los conocimientos esenciales sobre la enfermedad han crecido rápidamente a raíz de los estudios clínicos de Ivar Wickman publicados en 1907. Hoy disponemos de información precisa acerca del microorganismo responsable, de cómo sale del cuerpo infectado, principalmente con las secreciones nasofaríngeas, y penetra en otro ser humano a través de sus membranas mucosas; y, al parecer, solo de ese modo.»

En caso de incendio

«Las estanterías mejoradas proporcionan un medio que permite salvar del fuego con rapidez artículos almacenados valiosos, libros de una biblioteca pública y de armarios, cajas de correspondencia en las agencias de correos, etcétera. El grabado adjunto lo ilustra. Las estanterías forman secciones que pueden cerrase con gran rapidez y sacarse de un edificio a toda prisa sin retirar de ellas los artículos o los libros. Las bases de las estanterías están provistas de rodillos o ruedas que se apoyan en raíles. Esta mejora es merecedora del aprecio general.»





1869: Gracias a las estanterías móviles, un empleado pone a salvo las existencias durante un incendio.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXI, N.º 14, 2 DE OCTUBRE DE 1869

MONOGRÁFICO ESPECIAL

VERDAD, MENTIRAS E INCERTIDUMBRE



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
ACTING EDITOR IN CHIEF: Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE
Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *Visión nocturna*; Rosa Pujol Pina: *La mente de dos gusanos*; Fabio Teixidó: *Informe especial: El futuro del Ártico*; Marián Beltrán: *La IA, en manos privadas*; M. Gonzalo Claros: *Control darwiniano del cáncer*; José Oscar Hernández Sendín: *Un paso más cerca de los plásticos verdaderamente reciclables* e *Imaginación artificial*; Xavier Roqué: *Einstein, Newton o Pasteur no eran unos santos*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España